

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE LAPIDAÇÃO PLANA**  
**COMO FERRAMENTA PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA**  
**CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**JOEL MARTINS CRICHIGNO FILHO**

**FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 1994**


SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE LAPIDAÇÃO PLANA  
COMO FERRAMENTA PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

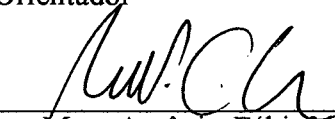
JOEL MARTINS CRICHIGNO FILHO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE


MESTRE EM ENGENHARIA


ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL  
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

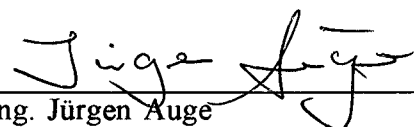
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Eng. Mec. Antônio Fábio da Silva  
Coordenador da Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Eng. Mec. Armando Albertazzi Júnior

  
\_\_\_\_\_  
Dr. -Ing. Jürgen Auge

Aos meus pais

À minha esposa

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Joel e Maria do Carmo, que sempre me apoiaram e ajudaram em todos os momentos da minha vida.

À minha esposa Janir pela dedicação, carinho e apoio.

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, pelo exemplo e pela orientação deste trabalho.

À CAPES e CNPq - Programa RHAE - Mecânica de Precisão, pela concessão das bolsas de estudos e recursos que viabilizaram este trabalho.

À EMBRACO S.A. pelo apoio na realização de todos os trabalhos apresentados no escopo deste.

Ao M. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, pelo exemplo de organização, ajuda, conselhos e o inestimável apoio na realização deste trabalho.

Aos amigos de luta e mestrandos Ricardo Machado Peres e Daniel Hioki pelo companherismo, cooperação, ajuda e exemplos desde o início do mestrado.

Aos bolsistas de Iniciação Científica, Alessandro Besen Barbosa, Alexandre Hildes G. Ramos, Dauri Alberto Grellmann, Hewerson Raniére da Silva, Juliano Scherner Rossi, Luis Henrique Figueiredo, Manfred Molz, Maurício Cappra Pauletti, Oliver Odebrecht, Régis Scapini Marques, Ricardo Vieira Antunes pela dedicação na realização dos ensaios, confecção de relatórios, artigos, dissertação e todos os trabalhos apresentados no escopo deste.

Aos mestrandos Aloisio José Schuitek, João Carlos Oliveira Lopes, Ivan da Costa Pereira Filho pelas sugestões e apoio dispensados.

A pesquisadora Yara Lemr e a bolsista Cláudia Heusi Silveira pelo apoio computacional na implementação do software de simulação do processo de lapidação plana.

Aos técnicos e bolsistas do Laboratório de Mecânica de Precisão pelo apoio prestado.

Aos colegas de curso e professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

## RESUMO

A necessidade da obtenção de peças com qualidade superficial extremamente elevada, em conjunto com estreita precisão de forma e tolerâncias dimensionais, obteníveis através do processo de lapidação, tem uma importância elevada no estado atual da técnica.

Diversos fatores determinam a potencialidade deste processo. A qualidade superficial e a remoção de material obtidas são influenciadas pelas grandezas relacionadas ao meio de lapidação e aos parâmetros tecnológicos. Já a precisão de forma, erros de planicidade e paralelismo são determinados através da escolha correta dos fatores cinemáticos, do posicionamento das peças na gaiola, da pressão de lapidação e de um disco de lapidação com baixos erros de forma.

Neste trabalho são estudadas as influências das variáveis de entrada nos resultados do processo. Utilizando-se o modelamento da cinemática e do desgaste do disco de lapidação plana, faz-se a simulação do desgaste do disco e das peças posicionadas na gaiola em função dos vários fatores. A verificação experimental, procedida a seguir, é executada no intuito de comprovar a influência da cinemática do processo sobre os erros de planicidade e paralelismo da peça lapidada, como também a determinar a influência dos principais parâmetros do processo sobre a rugosidade e remoção de material.

Os resultados de remoção obtidos são equacionados e simulados para uma determinada condição, mostrando sua aplicação na determinação dos parâmetros ótimos, objetivando um desgaste homogêneo do disco de lapidação e um baixo erro de planicidade e paralelismo das peças lapidadas.

## **ABSTRACT**

The need of workpieces with high surface quality, accuracy of shape and dimensional tolerances has a great importance in actual state of the technic. Lapping process is one of the few process which permit obtain this requisits.

Some factors determine the potenciality of this process. The surface quality and material removal are influenced by lapping compound and machinig parameters. The accuracy of shape, flatness and plane parallelism are determined throught correct choice of cinematics, the workpieces position within a cluster, the lapping pressure and a flat lapping wheel.

This work studies the influence of machining parameters. Using a cinematic and a lap wear model the simulation of lap wear and workpieces removal are obtained. An experimental investigation is done to prove the cinematic influence on flatness and plane parallelism of workpieces. The influence of principal parameters on surface roughness and material removal are also investigated.

The material removal is equationated and simulated for a specific condition. The simulation shows the aplication field with optimal results with the objective of lowest flatness and plane parallelism of workpieces.

## ÍNDICE

|   |      |
|---|------|
| AGRADECIMENTOS .....  | III  |
| RESUMO .....  | V    |
| ABSTRACT .....  | VI   |
| ÍNDICE .....  | VII  |
| LISTA DE FIGURAS .....  | XIII |
| SIMBOLOGIA .....  | XX   |
| 1 - INTRODUÇÃO .....  | 1    |
| 2 - OBJETIVOS .....   | 4    |
| 3 - ESTADO DA ARTE .....  | 6    |
| 3.1 - A HISTÓRIA DA LAPIDAÇÃO .....                               | 6    |
| 3.2 - PRINCÍPIO DA LAPIDAÇÃO PLANA E LAPIDADORAS .....            | 7    |
| 3.2.1 - PROCESSO DE LAPIDAÇÃO PLANA .....                         | 8    |
| 3.2.2 - LAPIDADORAS PLANAS .....                                  | 9    |
| 3.2.3 - FIXAÇÃO DAS PEÇAS .....                                   | 12   |
| 3.2.4 - DISCOS DE LAPIDAÇÃO .....                                 | 13   |
| 3.3 - CONSIDERAÇÕES BÁSICAS PARA A USINAGEM NA<br>LAPIDAÇÃO ..... | 14   |

|   |    |
|---|----|
| 3.3.1 - MODELOS DE REMOÇÃO DO PROCESSO DE LAPIDAÇÃO .....                             | 14 |
| 3.3.2 - USINABILIDADE .....   | 17 |
| 3.2.3 - DESGASTE DOS GRÃOS NA LAPIDAÇÃO .....   | 18 |
| 3.2.4 - TENSÃO RESIDUAL NA LAPIDAÇÃO .....  | 18 |
| 3.4 - MEIOS DE LAPIDAÇÃO .....  | 20 |
| 3.4.1 - ABRASIVOS   |    |
| - MATERIAIS ABRASIVOS .....   | 21 |
| - TAMANHO DE GRÃO .....   | 23 |
| - FORMA DE GRÃO .....   | 24 |
| 3.4.2 - MEIO DE SUSPENSÃO .....   | 25 |
| 3.5 - GRANDEZAS DE ENTRADA DO SISTEMA .....   | 26 |
| 3.5.1 - GRANDEZAS ESPECÍFICAS DO MEIO DE LAPIDAÇÃO ...                                | 26 |
| - MATERIAL DO GRÃO ABRASIVO .....   | 26 |
| - TAMANHO DO GRÃO ABRASIVO .....  | 27 |
| - FAIXA DE VARIAÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO ....   | 29 |
| - MEIO DE SUSPENSÃO .....   | 31 |
| - CONCENTRAÇÃO .....  | 32 |
| 3.5.2 - GRANDEZAS ESPECÍFICAS DO PROCESSO .....                                       | 33 |
| - DISCO DE LAPIDAÇÃO .....  | 33 |
| - ALIMENTAÇÃO E QUANTIDADE DO MEIO DE LAPIDAÇÃO .....                                 | 36 |
| - TRAJETÓRIA E VELOCIDADE DE LAPIDAÇÃO ....   | 37 |
| - PRESSÃO DE LAPIDAÇÃO .....  | 39 |
| - TEMPO DE LAPIDAÇÃO .....  | 41 |
| 3.6 - FATORES INFLUENTES SOBRE A PRECISÃO DE FORMA NA LAPIDAÇÃO DE PEÇAS PLANAS ..... | 41 |



|  |    |
|--|----|
| 3.6.1 - INFLUÊNCIA DA PRESSÃO SOBRE A PRECISÃO DE<br>FORMA .....                     | 42 |
| 3.6.2 - INFLUÊNCIA DO ERRO DE FORMA DO DISCO SOBRE<br>O ERRO DE FORMA DA PEÇA. ....  | 44 |
| 3.6.3 - INFLUÊNCIA DA CINEMÁTICA SOBRE A PRECISÃO DE<br>FORMA DAS PEÇAS. ....        | 46 |
| 3.7 - EQUACIONAMENTO DA REMOÇÃO .....  | 47 |
| 3.7.1 - ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DE VELOCIDADE<br>PONTUAL DA PEÇA .....                 | 47 |
| 3.6.2 - ATRAVÉS DA ANÁLISE DIMENSIONAL .....   | 49 |
| <br>4 - MODELAMENTO DA CINEMÁTICA E DO DESGASTE DO DISCO NA<br>LAPIDAÇÃO PLANA ..... | 54 |
| 4.1 - MODELO DA CINEMÁTICA DA LAPIDAÇÃO PLANA .....                                  | 54 |
| 4.1.1 - MODELAMENTO DO MOVIMENTO .....   | 54 |
| 4.1.2 - PERÍODO .....  | 57 |
| 4.1.3 - FORMAS DE MOVIMENTAÇÃO MACROKINEMÁTICAS ..                                   | 59 |
| 4.1.4 - FORMAS DE MOVIMENTAÇÃO MICROKINEMÁTICA ....                                  | 61 |
| 4.2 - MODELO DE DESGASTE DO DISCO DE LAPIDAÇÃO E DAS<br>PEÇAS LAPIDADAS .....        | 62 |
| 4.2.1 - MODELO DO DESGASTE CINEMÁTICO DA PEÇAS<br>LAPIDADAS. ....                    | 63 |
| 4.2.2 - MODELO DE DESGASTE DO DISCO .....  | 64 |
| <br>5 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESGASTE DO DISCO DE<br>LAPIDAÇÃO E DA PEÇA .....      | 68 |
| 5.1 - DESCRIÇÃO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO ....                            | 68 |

|   |     |
|---|-----|
|   | X   |
| 5.1.1 - MÓDULO DE DEFINIÇÕES .....                                | 69  |
| 5.1.2 - MÓDULO DO CÁLCULO DA TRAJETÓRIA .....                     | 70  |
| 5.1.3 - MÓDULO DO CÁLCULO DA VELOCIDADE .....                     | 70  |
| 5.1.4 - MÓDULO DO CÁLCULO DO DESGASTE .....                       | 71  |
| - DESCRIÇÃO GEOMÉTRICA DAS PEÇAS .....                            | 71  |
| - POSICIONAMENTO DAS PEÇAS .....                                  | 72  |
| - CÁLCULO DA DENSIDADE DE DESGASTE DO<br>DISCO DE LAPIDAÇÃO ..... | 72  |
| - CÁLCULO DO DESGASTE DA PEÇA LAPIDADA. ....                      | 73  |
| 5.2 - SIMULAÇÃO DO DESGASTE DO DISCO DE LAPIDAÇÃO .....           | 74  |
| 5.2.1 - POSICIONAMENTO DA PEÇA NA GAIOLA .....                    | 74  |
| 5.2.2 - GEOMETRIA DA PEÇA. ....                                   | 78  |
| 5.2.3 - POSICIONAMENTO DE PEÇAS COM GEOMETRIA<br>DIFERENTES ..... | 83  |
| 5.2.4 - MUDANÇA DAS VELOCIDADES .....                             | 86  |
| - EM FUNÇÃO DO POSICIONAMENTO DAS PEÇAS NA<br>GAIOLA. ....        | 86  |
| - EM FUNÇÃO DO ANEL DE DRESSAMENTO .....                          | 89  |
| 5.2 - SIMULAÇÃO DA REMOÇÃO DA PEÇA .....                          | 91  |
| 5.2.2 - POSICIONAMENTO DA PEÇA NA GAIOLA .....                    | 92  |
| 5.2.3 - COMPONENTES DE VELOCIDADES .....                          | 95  |
| 5.2.3 - TEMPO DE LAPIDAÇÃO .....                                  | 96  |
| 5.2.4 - TAMANHO DA PEÇA .....                                     | 98  |
| 6 - VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL .....                                | 101 |
| 6.1 - OBJETIVOS .....   | 101 |
| 6.2 - CONDIÇÕES DE ENSAIO .....                                   | 102 |
| 6.3 - EQUIPAMENTOS DE ENSAIO .....                                | 104 |

|  |         |
|--|---------|
|  | XI      |
| 6.4 - GRANDEZAS DE SAÍDA ANALISADAS .....  | 106     |
| 6.5 - METODOLOGIA DE MEDIÇÃO .....   | 106     |
| 6.5.1- MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE .....   | 106     |
| 6.5.2- MEDIÇÃO DA REMOÇÃO .....  | 106     |
| 6.6 - EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO .....  | 107     |
| 6.7 - CÁLCULO DO ERROS DE PLANICIDADE E PARALELISMO .....  | 108     |
| 6.7.1 - CÁLCULO DO ERRO DE PLANICIDADE .....   | 108     |
| 6.7.2 - CÁLCULO DO ERRO DE PARALELISMO .....   | 109     |
| 6.8 - METODOLOGIA DE ENSAIO .....  | 110     |
| <br>7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....   | <br>112 |
| 7.1 - INFLUÊNCIAS SOBRE A RUGOSIDADE E REMOÇÃO .....   | 112     |
| 7.1.1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO .....  | 112     |
| 7.1.2 - INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE TRAJETÓRIA E<br>DA VELOCIDADE MÉDIA DE UM PONTO DA PEÇA ..... | 114     |
| 7.1.3 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO .....   | 117     |
| 7.1.4 - INFLUÊNCIA DO MEIO DE SUSPENSÃO .....  | 119     |
| 7.1.5 - INFLUÊNCIA DA PRESSÃO .....  | 119     |
| 7.2 - INFLUÊNCIA SOBRE OS ERROS DE FORMA .....   | 121     |
| 7.2.1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO .....  | 121     |
| 7.2.3 - INFLUÊNCIA DA PRESSÃO .....  | 122     |
| <br>8 - EQUACIONAMENTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E<br>SIMULAÇÃO DA REMOÇÃO .....                | <br>124 |
| 8.1 - EQUACIONAMENTO DA REMOÇÃO .....  | 124     |
| <br>9 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS .....  | <br>132 |

|  |     |
|--|-----|
|  | XII |
| 10 - BIBLIOGRAFIA .....  | 135 |
| ANEXO A - PERFIL DO CORPO DE PROVA EM FUNÇÃO DO TEMPO E<br>PERFIL DE REMOÇÃO TOTAL. .... | 138 |
| ANEXO B - ESTUDO DA RUGOSIDADE ATRAVÉS DA ANÁLISE DA<br>VARIÂNCIA .....                  | 141 |
| ANEXO C - GRÁFICOS DA VELOCIDADE DE PONTOS DO CORPO DE<br>PROVA .....                    | 153 |
| ANEXO D - CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO .....   | 156 |

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

|   |   |
|---|---|
| Figura - 1.1: Parâmetros que influem no processo de lapidação . . . . . | 2 |
|---|---|

### CAPÍTULO 3

|  |    |
|--|----|
| Figura - 3.1: Esquema de uma lapidadora primitiva . . . . .  | 6  |
| Figura - 3.2: Classificação dos processos de lapidação . . . . .   | 8  |
| Figura - 3.3 : Lapidadora com acionamento por engrenamento externo . . . . .   | 10 |
| Figura - 3.4: Lapidadora de dois disco, sem sistema de guiagem das peças . . . . .   | 11 |
| Figura - 3.5: Princípio de uma lapidadora de um disco . . . . .  | 12 |
| Figura - 3.6 : Atuação do grão na fenda de lapidação . . . . .   | 15 |
| Figura - 3.7 : Modelo do mecanismo que ocorre em materiais metálicos na região de<br>separação da camada superficial . . . . . | 16 |
| Figura - 3.8: Remoção de material pelo ataque do grão . . . . .  | 17 |
| Figura - 3.9: Distribuição de tensões de cisalhamento e zona de deformação plástica<br>. . . . .                               | 19 |
| Figura - 3.10: Tensão residual em uma superfície de Ni-Zn . . . . .  | 19 |
| Figura - 3.11: Grãos achatados e em forma de agulha (A) e grãos compactos (B) . . . . .  | 24 |
| Figura - 3.12 : Capacidade de remoção em função do tamanho médio de grão . . . . .   | 28 |
| Figura - 3.13 : Qualidade superficial em função do tamanho médio de grão . . . . .   | 29 |
| Figura - 3.14 : Remoção na peça em função da faixa de tamanho de grão de<br>diamante. . . . .                                  | 30 |
| Figura - 3.15 : Rugosidade em função da faixa de tamanho de grão de diamante . . . . .   | 31 |
| Figura - 3.16: Remoção de material em função da quantidade de abrasivo no meio de  |    |

|  |    |
|--|----|
| suspensão .....  | 32 |
| Figura - 3.17: Rugosidade Ra em função da quantidade de abrasivo no meio de suspensão .....                                | 33 |
| Figura - 3.18: Remoção na peça em função de diferentes materiais de disco de lapidação, com vários materiais de peça ..... | 34 |
| Figura - 3.19: Rugosidade Rt da peça com diferentes materiais de disco de lapidação, em função do tempo .....              | 35 |
| Figura - 3.20: Ra em função da velocidade de lapidação .....   | 38 |
| Figura - 3.21: Remoção em função da velocidade de lapidação .....  | 38 |
| Figura - 3.22: Influência da pressão de lapidação sobre a remoção .....  | 39 |
| Figura - 3.23: Rugosidade da peça em dependência da pressão de lapidação .....   | 40 |
| Figura - 3.24: Esquema da atuação das forças sobre a peça na lapidação .....   | 43 |
| Figura - 3.25: Desgaste do disco de lapidação ao longo do tempo .....  | 44 |
| Figura - 3.26: Erro de planicidade do disco de lapidação e da peça em função do tempo .....                                | 45 |
| Figura - 3.27: Erro de planicidade da peça em função do erro de forma do disco de lapidação .....                          | 45 |
| Figura - 3.28: Diagrama de remoção, para uma lapidadora planetária .....   | 46 |
| Figura - 3.29: Remoção em função da velocidade para diferentes condições .....   | 48 |
| Figura - 3.30: Intensidade de remoção em função da velocidade pontual .....  | 49 |
| Figura - 3.34: Remoção de material em função da velocidade .....   | 51 |
| Figura - 3.35: Remoção da área da peça .....   | 53 |

## CAPÍTULO 4

|  |    |
|--|----|
| Figura - 4.1 : Modelo da cinemática da lapidação plana .....     | 55 |
| Figura - 4.2: Período Tz para uma trajetória hipococloidal ..... | 58 |
| Figura - 4.3: Gráfico da determinação de Tw .....                | 58 |

|   |    |
|---|----|
| Figura - 4.4: Tempo de repetição $T_w$ para duas diferentes trajetórias .....                     | 59 |
| Figura - 4.5: Trajetórias curvas epi e hipocicloidais .....                                       | 60 |
| Figura - 4.6: Princípio de superposição de formas de movimentos micro e<br>macrocinemáticos ..... | 61 |
| Figura - 4.7: Posicionamento de uma peça prismática. ....   | 63 |
| Figura - 4.8: Setorização do disco de lapidação .....   | 65 |
| Figura - 4.9: Descrição dos comprimentos de arcos da peça .....                                   | 66 |

## CAPÍTULO 5

|   |    |
|---|----|
| Figura - 5.1: Diagrama geral do simulador de lapidação .....                          | 69 |
| Figura - 5.2: Dados de entrada. ....  | 69 |
| Figura - 5.3: Trajetória de um ponto da peça em relação ao disco de lapidação. ....   | 70 |
| Figura - 5.4: Velocidade de um ponto da peça em função do tempo. ....                 | 71 |
| Figura - 5.5: Posicionamento das peças na gaiola. ....                                | 72 |
| Figura - 5.6: Gráfico da densidade de desgaste do disco de lapidação. ....            | 73 |
| Figura - 5.7: Gráfico da densidade de trajetória de uma peça lapidada. ....           | 74 |
| Figura - 5.8: Posicionamento da peça na periferia da gaiola. ....                     | 75 |
| Figura - 5.9: Gráfico do desgaste do disco de lapidação. ....                         | 75 |
| Figura - 5.10: Posicionamento da peça próximo ao centro do disco. ....                | 76 |
| Figura - 5.11: Gráfico do desgaste do disco de lapidação. ....                        | 76 |
| Figura - 5.12: Trajetória de um ponto da peça. ....                                   | 77 |
| Figura - 5.13: Trajetória de um ponto da peça mais afastada do centro da gaiola. .... | 78 |
| Figura - 5.14: Tamanho inicial da peça e seu posicionamento na gaiola. ....           | 79 |
| Figura - 5.15: Tamanho final da peça e seu posicionamento na gaiola. ....             | 79 |
| Figura - 5.16: Desgaste do disco para a geometria inicial .....                       | 80 |
| Figura - 5.17: Desgaste do disco para a geometria final da peça .....                 | 80 |

|  |    |
|--|----|
| Figura - 5.18: Posicionamento de uma peça cilíndrica. ....   | 81 |
| Figura - 5.19: Desgaste do disco de lapidação para a figura acima. ....                            | 82 |
| Figura - 5.20: Peça cilíndrica anelar posicionada na gaiola. ....                                  | 82 |
| Figura - 5.21: Desgaste do disco de lapidação para a figura acima. ....                            | 83 |
| Figura - 5.22: Posicionamento de peças na gaiola. ....   | 84 |
| Figura - 5.23: Desgaste do disco de lapidação para a configuração mostrada<br>na figura 5.22. .... | 84 |
| Figura - 5.24: Disposição das peças na gaiola. ....  | 85 |
| Figura - 5.25: Desgaste do disco de lapidação para a configuração mostrada<br>na figura 5.24. .... | 85 |
| Figura - 5.26: Condições iniciais de lapidação. ....   | 86 |
| Figura - 5.27: Posicionamento da peça na gaiola. ....  | 87 |
| Figura - 5.28: Desgaste mais acentuado na periferia do disco de lapidação. ....                    | 87 |
| Figura - 5.29: Desgaste mais acentuado no centro do disco. ....                                    | 88 |
| Figura - 5.30: Desgaste mais homogêneo do disco de lapidação. ....                                 | 89 |
| Figura - 5.31: Desenho do anel de dressamento. ....  | 90 |
| Figura - 5.32: Desgaste do disco de lapidação em função do anel de dressamento. ....               | 90 |
| Figura - 5.33: Desgaste do disco de lapidação para uma nova condição. ....                         | 91 |
| Figura - 5.34: Posicionamento da peça na periferia da gaiola. ....                                 | 92 |
| Figura - 5.35: Densidade de trajetória da peça posicionada na periferia da gaiola. ....            | 93 |
| Figura - 5.36: Posicionamento da peça mais no centro da gaiola. ....                               | 93 |
| Figura - 5.37: Densidade de trajetória para a peça posicionada mais no<br>centro da gaiola. ....   | 94 |
| Figura - 5.38: Condições de lapidação. ....  | 95 |
| Figura - 5.39: Densidade de trajetória para a modificação da velocidade. ....                      | 96 |
| Figura - 5.40: Densidade de trajetória para 2 min. de lapidação. ....                              | 97 |
| Figura - 5.41: Densidade de trajetória para 10 min. de lapidação. ....                             | 97 |
| Figura - 5.42: Posicionamento da peça pequena na periferia da gaiola. ....                         | 98 |



|   |     |
|---|-----|
| Figura - 5.43: Densidade de trajetória para a peça pequena posicionada na periferia da gaiola. .... | 99  |
| Figura - 5.44: Posicionamento da peça grande na gaiola. ....  | 99  |
| Figura - 5.45: Densidade de distribuição de trajetória para a peça grande. ....                     | 100 |

## CAPÍTULO 6

|  |     |
|--|-----|
| Figura - 6.1: Dimensões do corpo de prova. ....  | 102 |
| Figura - 6.2: Esquema utilizado para distribuição dos pesos sobre o corpo de prova. .... | 103 |
| Figura - 6.3: Posicionamento da peça na gaiola. ....                                     | 104 |
| Figura - 6.4: Fotografia da lapidadora empregada nos ensaios. ....                       | 104 |
| Figura - 6.5: Dimensões da lapidadora plana LMP. ....                                    | 105 |
| Figura - 6.6: Sistema de referência para a medição do corpo de prova. ....               | 106 |
| Figura - 6.7: Dispositivo para medição de remoção. ....                                  | 107 |
| Figura - 6.8 : Determinação do erro de planicidade. ....                                 | 109 |
| Figura - 6.9 : Determinação do erro de paralelismo entre planos. ....                    | 109 |

## CAPÍTULO 7

|   |     |
|---|-----|
| Figura - 7.1: Remoção em função do tempo para diferentes pressões. ....                     | 113 |
| Figura - 7.2: Ra em função do tempo para diferentes pressões. ....                          | 114 |
| Figura - 7.3: Rz em função do tempo para diferentes pressões. ....                          | 114 |
| Figura - 7.4: Remoção em função do comprimento de trajetória para diferentes pressões. .... | 115 |
| Figura - 7.5: Remoção em função do comprimento de trajetória. ....                          | 116 |
| Figura - 7.6: Remoção em função da velocidade média. ....                                   | 117 |
| Figura - 7.7: Remoção em função da concentração. ....                                       | 117 |
| Figura - 7.8: Ra em função da concentração. ....  | 118 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura - 7.9: Rz em função da concentração. ....                        | 118 |
| Figura - 7.10: Remoção em função da pressão. ....                       | 119 |
| Figura - 7.11: Ra em função da pressão. ....                            | 120 |
| Figura - 7.12: Rz em função da pressão. ....                            | 120 |
| Figura - 7.13: Perfil inicial. ....                                     | 121 |
| Figura - 7.14: Remoção total. ....                                      | 121 |
| Figura - 7.15: Erro de planicidade em função da pressão. ....           | 122 |
| Figura - 7.16: Ângulo do erro de paralelismo em função da pressão. .... | 123 |
| Figura - 7.17: Ângulo do erro de planicidade segundo a direção y. ....  | 123 |

## CAPÍTULO 8

|  |     |
|--|-----|
| Figura - 8.1: Gráfico do produto adimensionais $\Pi_1$ em função de $\Pi_2$ . .... | 125 |
| Figura - 8.2: Velocidade vo em função da pressão. ....                             | 126 |
| Figura - 8.3: Comparação da remoção calculada e medida experimentalmente. ....     | 127 |
| Figura - 8.4: Erro relativo em função da remoção de material. ....                 | 128 |
| Figura - 8.5: Parâmetros cinemáticos. ....   | 128 |
| Figura - 8.6: Posicionamento da peça. ....   | 129 |
| Figura - 8.7: Parâmetros de remoção. ....  | 129 |
| Figura - 8.8: Gráfico da remoção da peça. ....                                     | 130 |
| Figura - 8.9: Gráfico da densidade de trajetória. ....                             | 131 |

## ANEXO A

|  |     |
|--|-----|
| Figura - 1: Perfil inicial. ....                   | 138 |
| Figura - 2: Perfil após 10 min. de lapidação. .... | 138 |
| Figura - 3: Perfil após 20 min. de lapidação. .... | 138 |
| Figura - 4: Perfil total de remoção. ....          | 138 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura - 5: Perfil inicial. ....                    | 139 |
| Figura - 6: Perfil após 10 min. de lapidação. ....  | 139 |
| Figura - 7: Perfil após 20 min. de lapidação. ....  | 139 |
| Figura - 8: Perfil total de remoção. ....           | 139 |
| Figura - 10: Perfil inicial . ....                  | 139 |
| Figura - 11: Perfil após 10 min. de lapidação. .... | 139 |
| Figura - 12: Perfil após 20 min. de lapidação. .... | 140 |
| Figura - 13: Perfil total de remoção. ....          | 140 |
| Figura - 14: Perfil inicial. ....                   | 140 |
| Figura - 15: Perfil após 10 min. de lapidação. .... | 140 |
| Figura - 16: Perfil após 20 min. de lapidação. .... | 140 |
| Figura - 17: Perfil total de remoção. ....          | 140 |

## ANEXO C

|   |     |
|---|-----|
| Figura - 1: Gráfico da velocidade em função do tempo da posição 0. ....       | 153 |
| Figura - 2: Gráfico da velocidade em função do tempo das posições 1 e 7. .... | 154 |
| Figura - 3: Gráfico da velocidade em função do tempo das posições 2 e 6. .... | 154 |
| Figura - 4: Gráfico da velocidade em função do tempo das posições 3 e 5. .... | 155 |
| Figura - 5: Gráfico da velocidade em função do tempo da posição 4. ....       | 155 |

## ANEXO D

|   |     |
|---|-----|
| Figura - 1: Curva do erro sistemático no sentido anti-horário. .... | 156 |
| Figura - 2: Curva do erro sistemático no sentido horário. ....      | 157 |

## SIMBOLOGIA

| SÍMBOLO       | UNIDADE | DENOMINAÇÃO                                     |
|---------------|---------|---|
| $A_{GD}$      | $m^2$   | Área de contato                                 |
| $A_{peça}$    | $m^2$   | Área da peça                                    |
| $C$           | $m$     | Distância do centro da gaiola ao centro da peça |
| $C_{1,...,6}$ |         | Fatores de proporcionalidade                    |
| $D$           | $m$     | Diâmetro da peça                                |
| $F_{nG}$      | $N$     | Força normal por grão                           |
| $F_G$         | $N$     | Força por grão                                  |
| $F_{tG}$      | $N$     | Força tangencial por grão                       |
| $F_v$         | $N$     | Força vertical que atua sobre a peça            |
| $F_h$         | $N$     | Força horizontal que atua na peça               |
| $H$           |         | Centro da gaiola                                |
| $K$           |         | Classes do disco de lapidação                   |
| $K_i$         |         | Intensidade de remoção                          |
| $K_t$         |         | Fator cinemático                                |
| $N_{int}$     |         | Número de dentes da engrenagem interna          |
| $N_{ext}$     |         | Número de dentes da engrenagem externa          |
| $N_{gai}$     |         | Número de dentes da gaiola                      |
| $O$           |         | Centro do disco de lapidação                    |
| $P$           |         | Ponto da peça                                   |
| $P_{ajus}$    |         | Plano ajustado                                  |
| $P_{inf}$     |         | Plano inferior ao plano Pajus                   |
| $P_{sup}$     |         | Plano superior ao plano Pajus                   |
| $R$           | $\mu m$ | Remoção de material                             |
| $R_a$         | $\mu m$ | Desvio médio aritmético de rugosidade           |

|               |                    |  |
|---------------|--------------------|--|
| Rg            | m                  | Raio da gaiola                                       |
| Rr            | m                  | Distância centro do disco ao ponto da peça           |
| Rs            | $\mu\text{m}$      | Rugosidade do disco de lapidação                     |
| Rw            | $\mu\text{m}$      | Rugosidade da peça lapidada                          |
| Rz            | $\mu\text{m}$      | Profundidade média de rugosidade                     |
| S             | m                  | Comprimento de trajetória                            |
| Tg            | $\mu\text{m}$      | Tamanho de grão                                      |
| Tl            | min                | Tempo total de lapidação                             |
| Tz            | min                | Tempo de repetição da trajetória                     |
| Tw            | min                | Tempo de repetição do percurso                       |
| V             | m/min              | Velocidade de um ponto da peça                       |
| a             | mg                 | Remoção de material                                  |
| $a_{eG}$      | m                  | Profundidade de penetração teórica                   |
| $a_t$         | m/min <sup>2</sup> | Aceleração tangencial de um ponto da peça            |
| $b_{12, 23}$  |                    | Coefficientes de proporcionalidade                   |
| $d_d$         | m                  | Densidade de posição da gaiola                       |
| $d_G$         | $\mu\text{m}$      | Diâmetro médio do grão                               |
| $d_t$         | m                  | Densidade de trajetória                              |
| $g_{wj}$      | m                  | Comprimento dos segmentos de arco                    |
| hf            | m                  | Altura de aplicação da Fh                            |
| h             | $\mu\text{m}$      | Altura da fenda de trabalho                          |
| hr            | $\mu\text{m}$      | Profundidade de remoção                              |
| l             | mg/cm <sup>2</sup> | Quantidade do meio de lapidação                      |
| lp            | m                  | Distância do centro a um ponto do disco de lapidação |
| $m_{1,...,5}$ |                    | Expoentes  |
| p             | kPa                | Pressão de lapidação                                 |
| $r_w$         | m                  | Raio da peça   |
| $s_r$         |                    | Remoção específica                                   |

|                        |                   |   |
|------------------------|-------------------|---|
| $t$                    | mm                | Tempo de lapidação  |
| $w$                    |                   | Centro da peça  |
| $\Pi_{1,2,3}$          |                   | Produtos adimensionais  |
| $\alpha$               | °                 | Ângulo de atuação da força sobre o grão                         |
| $\lambda_x$            | °                 | Ângulo do erro de paralelismo segundo X                         |
| $\lambda_y$            | °                 | Ângulo do erro de paralelismo segundo Y                         |
| $\mu$                  |                   | Coefficiente de atrito dinâmico                                 |
| $\rho$                 | g/cm <sup>3</sup> | Densidade de material   |
| $\tau_{\max}$          | MPa               | Tensão sub superficial máxima                                   |
| $\psi_b$               | °                 | Ângulo de rotação da trajetória                                 |
| $\delta$               | °                 | Ângulo entre o sistema de referência fixo e o móvel             |
| $\delta r$             | °                 | Ângulo do vetor posição $R_r$ em relação ao sist. de ref. móvel |
| $\delta g$             | °                 | Ângulo do vetor posição $R_g$ em relação ao sist. de ref. móvel |
| $\delta Z_i$           | μm                | Desvio de planicidade   |
| $\omega_{\text{disc}}$ | RPM               | Velocidade angular do disco de lapidação                        |
| $\omega_g$             | RPM               | Velocidade angular da gaiola                                    |
| $\omega_r$             | RPM               | Velocidade angular da gaiola em relação ao disco de lapidação   |

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

A norma DIN define o processo de lapidação, como um processo de usinagem com grãos abrasivos soltos suspensos em um líquido ou em uma pasta, que transfere a forma da ferramenta de lapidação por uma remoção promovida por grãos que descrevem movimentos os mais aleatórios possíveis para a superfície da peça [1].

A lapidação é um processo de usinagem fino à ultrafino com o qual não só pode ser atingida uma qualidade superficial extremamente elevada, mas também, permite atingir uma precisão de forma e tolerâncias dimensionais acuradas, independente da dureza do material, até uma faixa de tolerância IT 1 [1].

As superfícies lapidadas apresentam forma geométrica e dimensões variadas de forma que os processos de lapidação específicos abrangem uma variação grande. Por motivos econômicos, eles não podem ser aplicados em todos os casos. No entanto, se as exigências em qualidade de uma peça são elevadas, o processo de lapidação comparado com o processo de usinagem de ultraprecisão, retificação fina ou brunimento mostra-se como um concorrente eficaz. Muitas vezes, o processo de lapidação é a única possibilidade que permite atingir as exigências de qualidade extremas de um componente [1].

Este processo envolve um grande número de variáveis, que são relacionadas ao meio de lapidação (grão abrasivo e fluido de lapidação), à tecnologia e à cinemática do processo, influenciando diretamente no resultado de trabalho (qualidade superficial, erros de forma, remoção e integridade superficial), figura 1 [2].

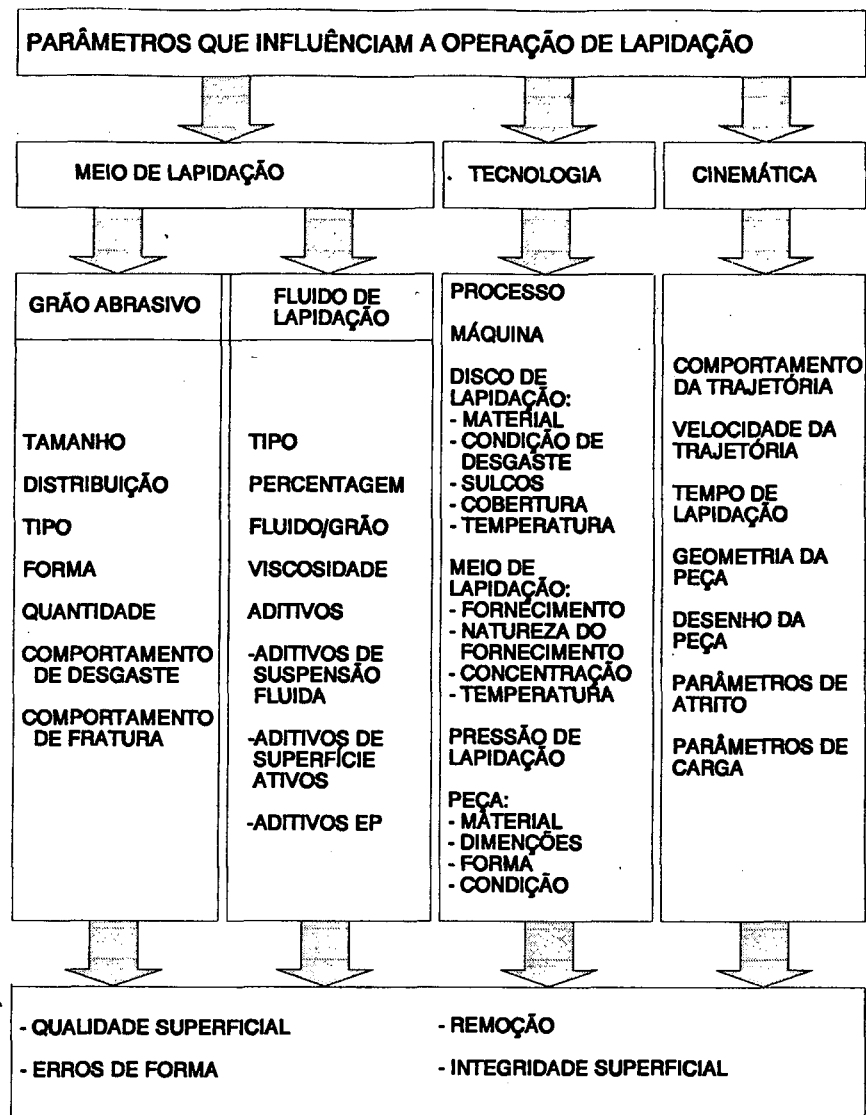


Figura - 1.1: Parâmetros que influem no processo de lapidação [2].

Um processo pode ser dominado se for possível determinar seus parâmetros variáveis de entrada como também modelar a relação entre a atuação destes, e a partir daí, influenciar o resultado de trabalho. Isto implica que, um processo é tão mais difícil de se dominar quanto maior for o número de parâmetros influentes e quanto mais desconhecida é a relação entre eles. A repetibilidade dos resultados de trabalho na lapidação, em comparação com outros processos de fabricação mais conhecidos, ainda depende da obtenção de muitos conhecimentos experimentais.



## **CAPÍTULO 2**

### **OBJETIVOS**

**PESQUISA BIBLIOGRÁFICA:** Pretende-se através do levantamento bibliográfico conhecer a influência dos principais parâmetros do processo sobre a rugosidade, remoção e erros de planicidade e paralelismo de peças lapidadas.

**EQUACIONAMENTO DA CINEMÁTICA:** Pretende-se equacionar a trajetória desenvolvida por cada ponto da peça em relação ao disco de lapidação, levantar o gráfico da velocidade de cada ponto, assim como determinar a distância percorrida. É objetivo também equacionar o desgaste do disco de lapidação em função dos fatores cinemáticos e características de posicionamento e forma das peças.

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO DO PROCESSO:** Pretende-se desenvolver um software para a simulação do processo, com o objetivo de obter informações qualitativas do desgaste do disco de lapidação e das peças lapidadas. Auxiliando na escolha dos parâmetros cinemáticos e de posicionamento das peças na gaiola, com o intuito da homogeneização do desgaste do disco de lapidação. E com isso, simular o desgaste do disco e das peças lapidadas em função dos parâmetro cinemático e do posicionamento das peças.

**VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL:** Pretende-se verificar experimentalmente a tendência qualitativa da remoção e da rugosidade em função dos parâmetros de entrada.

**EQUACIONAMENTO DOS RESULTADOS E SIMULAÇÃO:** Pretende-se equacionar os resultados de remoção em função dos principais parâmetros que são controláveis durante a execução do processo, no chão de fábrica, utilizando as mesmas características empregadas na verificação experimental, com o intuito de mostrar a tendência de remoção para uma determinada condição.

## CAPÍTULO 3

### ESTADO DA ARTE

#### 3.1 - A HISTÓRIA DA LAPIDAÇÃO

Segundo Stahl [3], na idade da pedra a lapidação era usada como um processo de fabricação de ferramentas e implementos. Através da rotação de um galho contra uma superfície contendo areia, era possível fazer furos. A figura 3.1 mostra um modelo baseado em achados arqueológicos.

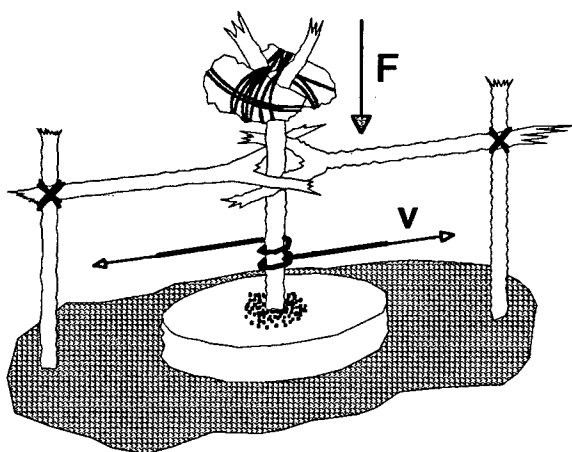


Figura - 3.1: Esquema de uma lapidadora primitiva [3].

A madeira era o material ideal para suportar as partículas de areia, e diferentes resultados poderiam ser obtidos pela escolha de vários tipos de areias, rotação do galho e pela variação das massas das pedras que eram penduradas sobre o galho.

Com a descoberta do metal, do forjamento e da ferramenta de corte, a lapidação tornou-se pouco importante, e caiu em desuso. Foi através da exigências à alta qualidade superficial requerida na produção de blocos padrão, e um crescimento da demanda para melhoria da

qualidade, que levou a uma renovação do interesse da técnica de lapidação. Muitas informações são mantidas em segredo, reduzindo a aplicação da tecnologia. Um importante passo foi decorrente da utilização do processo na óptica. Entretanto sua concepção como uma arte proibitivamente cara permaneceu e o progresso em direção a sua aplicação foi mais uma vez retardada pelos pobres resultados obtidos pelo método da lapidação manual. A técnica da lapidação manual era imprecisa, cara e massante, dependia da habilidade do operador e por isso, não houve um estudo em profundidade para eliminar os aspectos negativos do processo.

Foi através dos esforços industriais durante a segunda guerra mundial, para enormes demandas de qualidade, intercambiabilidade e produção em massa, seguido pelo crescimento da indústria automobilística, que houve um novo interesse na lapidação. A necessidade de tolerâncias dimensionais apertadas, e de qualidades superficiais finais asseguradas e padronizadas, abriram o caminho para a adoção da lapidação em escala industrial.

Os fabricantes de máquinas ferramentas também contribuíram para o progresso do processo de lapidação. Um importante desenvolvimento foi obtido quando a lapidação plana incorporou o anel de dressamento para correção contínua da superfície do disco de lapidação. As aplicações tornaram-se numerosas, e a lapidação passaria a ser uma séria concorrente da retificação, a qual é em alguns casos substituí completamente [3].

### **3.2 - PRINCÍPIO DA LAPIDAÇÃO PLANA E LAPIDADORAS**

A lapidação é um processo de acabamento com o uso de ferramenta de geometria não definida, no qual o grãos abrasivos soltos estão suspensos em um elemento fluido. O processo se divide em lapidação de forma e sem forma, figura 3.2. Na lapidação de forma a geometria da ferramenta é transpassada para a peça, enquanto na sem forma a ferramenta consiste do meio de lapidação, ao qual é fornecida energia para trabalhar a superfície da peça.

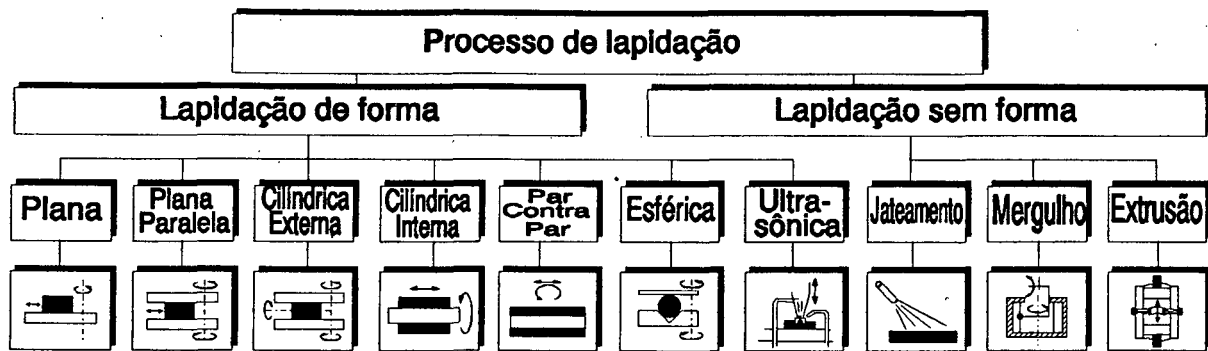


Figura - 3.2: Classificação dos processos de lapidação

### 3.2.1 - PROCESSO DE LAPIDAÇÃO PLANA

A lapidação plana é um processo empregado para a obtenção de peças planas, com alta qualidade superficial. O processo apresenta uma característica de trabalho simples, isto é, o trabalho é realizado em apenas uma superfície por vez, as peças são colocadas em dispositivos para sua guiagem sobre o disco de lapidação. O critério mais importante na qualificação das superfícies resultantes é a planicidade. Empregando-se dispositivos especiais é possível obter um elevado grau de paralelismo além de estreitas tolerâncias dimensionais [1].

Em peças nas quais é exigido que superfícies opostas apresentem um elevado grau de paralelismo entre si é empregado o princípio da lapidação plano paralela. Neste processo, as peças são posicionadas com a primeira face plana sobre o disco de lapidação, enquanto que a face oposta recebe sobre si um disco elástico de borracha, feltro, plástico ou outro material similar. Sobre este disco elástico é pressionado, então, o disco de carga. O material elástico possibilita que as partes das peças de maior espessura sejam mais fortemente solicitadas, e ao contrário, as partes das peças menores sofrem uma pressão de valor mais baixo ou mesmo insignificante.

Com a conclusão da lapidação na primeira face, as peças são invertidas de posição, sendo o carregamento das peças feito diretamente pelo disco de carga, sem o emprego do disco elástico intermediário. A remoção inicia-se novamente sobre as peças mais espessas e decorre até o momento em que todas as peças, dentro de uma faixa de tolerâncias, apresentem a mesma

espessura [1].

Stahli [3] recomenda o uso direto do disco de carga sobre a peça, sem o uso de material elástico.

### 3.2.2 - LAPIDADORAS PLANAS

As lapidadoras são máquinas ferramentas cujo princípio de funcionamento é relativamente simples, mas que produzem peças de superfícies planas com alta precisão, tanto dimensional quanto de forma. Estas máquinas são classificadas em lapidadoras de um e de dois discos. As lapidadoras de um disco lapidam apenas uma superfície por vez, utilizando um disco de lapidação. O carregamento sobre a peça necessário para sua usinagem é obtido pneumáticamente, pela colocação de massas ou através da força do operador. As peças são posicionadas dentro de anéis de dressamento ou gaiolas, que as guiam sobre o disco de lapidação [4].

As lapidadoras de dois discos são utilizadas principalmente na lapidação plana paralela. Estas consistem de um conjunto inferior com mecanismo e suporte para o disco de lapidação inferior, assim como para o acionamento da peça e um braço giratório com o disco de lapidação superior. Devido às grandes exigências sobre os resultados dos trabalhos são necessários elementos de construção das máquinas muito estáveis. Possuem, geralmente, uma base rígida, em construção fundida pesada. Nas máquinas pequenas o disco superior, e portanto a peça, é carregada pelo operador ou pneumáticamente, e nas grandes, hidráulica ou pneumáticamente. Para carregamentos iguais e para a compensação do erro do eixo, o disco superior é suportado de forma flutuante, de tal maneira que ele possa se adaptar ao disco inferior, o qual possui mancais estáveis. Movimentos sem vibrações dos mancais dos discos superior e inferior são primordiais para o bom funcionamento do processo [4].

As construções e equipamentos de máquinas variam de acordo com a grandeza e o campo de aplicação, existindo máquinas com discos de lapidação desde 300 até 1800 mm. Lapidadoras de dois discos CNC podem executar diferentes sequências de trabalho, controlando pressão, velocidade e remoção da peça ao longo do ciclo, possibilitando uma melhor confiabilidade, repetibilidade e precisão. Possuem, também, o controle de compensação automática do

desgaste do disco de lapidação e sistema de carregamento de gaiolas automático [4;5;6;7;22;35].

A figura 3.3 mostra uma lapidadora de dois discos. Nela, as peças são guiadas por uma gaiola dentada, esta por sua vez é acionada pelas engrenagens interna e externa, que podem ter um sistema de acionamento independente. O disco de lapidação superior e inferior também podem ter acionamentos independentes. Retirando-se o disco de lapidação superior, esta se torna uma lapidadora de um disco [8].

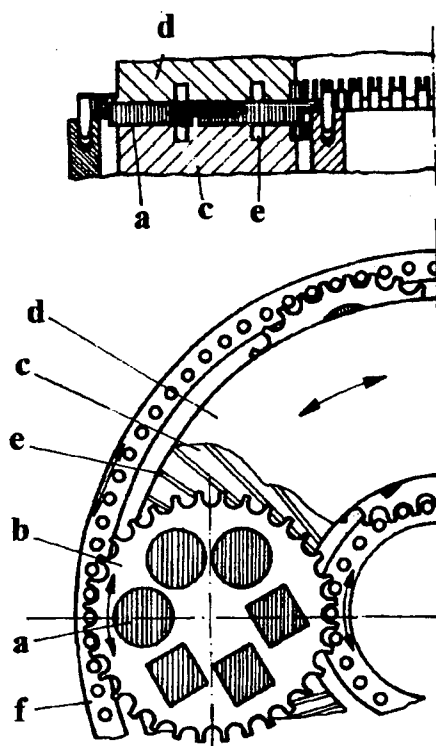


Figura - 3.3 : Lapidadora com acionamento por engrenamento externo [8].

a - peça; b - gaiola; c - disco inferior; d - disco superior; e - ranhuras,  
f - engrenagem externa

Uma variante da lapidadora acima é mostrada na figura 3.4. Nesta lapidadora as peças estão livres para se movimentar sem o emprego de um sistema para guia-las. A lapidadora tem aneis interno e externo para evitar a saída das peças para fora do disco de lapidação. As peças tem um movimento relativo em torno de seu próprio centro e estão sempre mudando de posição no disco de lapidação, garantindo que não serão lapidadas em uma posição preferencial [8].

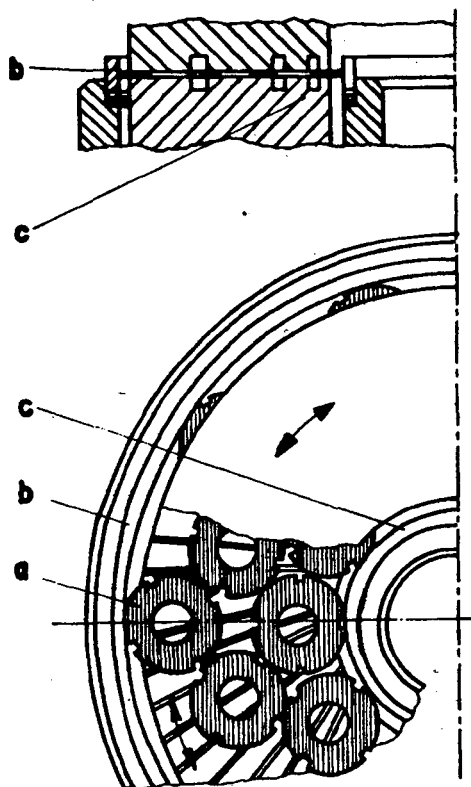


Figura -3.4: Lapidadora de dois disco, sem sistema de guiagem das peças [8].

a - peça; b - anel interno; c - anel externo.

Uma lapidadora de um disco é mostrada na figura 3.5 .Neste tipo, o anel de dressamento é acionado através das forças de atrito com o disco de lapidação, sendo apoiado em um garfo guia de roletes preso a estrutura da máquina. Dentro dos aneis as peças estão soltas ou colocadas em gaiolas. Este tipo de lapidadora tem a vantagem do anel desgastar constantemente a superfície do disco durante a lapidação e por isso, a planicidade é compensada através da variação do posicionamento radial do anel. Com isso se garante que a planicidade do disco se mantenha por muito tempo, melhorando a qualidade das peças lapidadas.



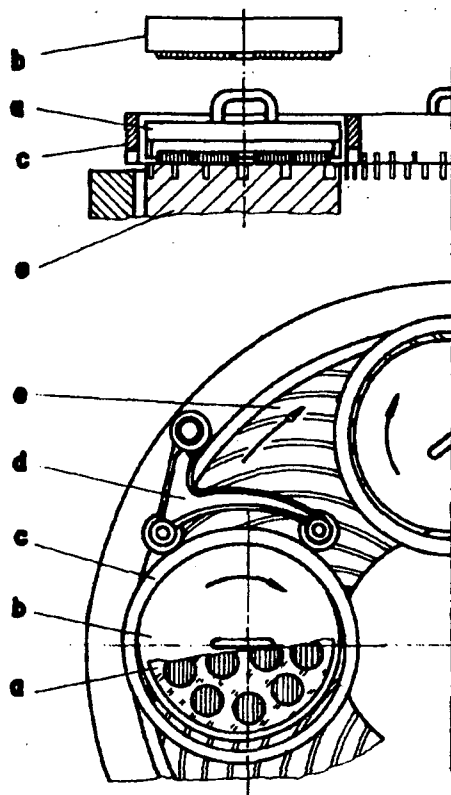


Figura - 3.5: Princípio de uma lapidadora de um disco [8].

a - gaiola; b - peso; c - anel de dressamento;  
d - braço de apoio; e - disco inferior.

### 3.2.3 - FIXAÇÃO DAS PEÇAS

Na lapidação plana as peças são posicionadas em gaiolas ou em anéis que possibilitam a contenção das peças e as guiam fazendo com que estas descrevam uma determinada trajetória, ou são apenas colocadas sobre o disco de lapidação, utilizando um sistema somente para manter as peças sobre o disco de lapidação. Os anéis colocados sobre os discos de lapidação são guiados por engrenamento ou braços laterais e tem seu movimento realizado por atrito, ou através acionamento externo.

As principais funções dos anéis de dressamento na lapidação são:

- Permitir a colocação das peças sobre o disco de lapidação (gaiolas);
- Permitir o dressamento do disco de lapidação de forma contínua durante a usinagem e garantir com isso a precisão geométrica do disco;
- Distribuição regular do meio de lapidação sobre o disco de lapidação;

- Remoção dos cavacos para a beirada do disco de lapidação ou para dentro das ranhuras previstas no disco de lapidação;
- O acionamento para obter componentes de movimentação suplementar das peças;
- Distribuição e remoção de calor [1].

Variações geométricas do disco de lapidação podem ser corrigidas pelo deslocamento radial dos anéis de dressamento. Peças com formas externas redondas muitas vezes são lapidadas sem o emprego de estruturas auxiliares dentro dos anéis de dressamento. As peças se encostam durante o trabalho, na superfície anelar e então são submetidas a um movimento (movimento planetário interno).

Peças com cantos vivos muitas vezes são colocadas dentro de chapelonas ou suportes feitos de material plástico, metal ou madeira ou materiais semelhantes. Os seus contornos são adequados aos contornos dos anéis de dressamento e das peças. Dessa forma a colisão de peças no anel é evitada. Na fabricação de peças em série, os tempos secundários podem ser consideravelmente diminuídos por esses meios auxiliares. Peças singulares, cuja a fixação não é possível nos anéis de dressamento, são lapidadas com fixações especiais sobre o disco de lapidação e submetidas a movimentos de rotação [1].

Na lapidação plana paralela em máquinas de dois discos as peças são mais comumente fixadas em gaiolas dentadas. As gaiolas tem o propósito de manter as peças distantes entre si guiando-as segundo movimentos cicloidais. Na fabricação de peças em série, os tempos secundários podem ser razoavelmente reduzidos com o emprego de gaiolas.

### **3.2.4 - DISCOS DE LAPIDAÇÃO**

O disco de lapidação serve como suporte para o meio de lapidação, peças, bem como para os anéis de dressamento e gaiolas. É geralmente confeccionado de ferro fundido perlítico com granulometria fina (dureza de 170 a 200 HB). No entanto, pode também ser confeccionado de liga de aço temperado. Para a remoção do calor que se forma durante o processo geralmente

é colocado, abaixo do disco de lapidação, um sistema de refrigeração.

É de grande importância que se tenha estrutura e dureza homogênea em ambos os discos de lapidação, sendo o resultado do trabalho muito influenciado por estes fatores.

Dependendo do fabricante, do tipo de máquina ou do tipo de trabalho são empregados discos lisos ou ranhurados. Os discos ranhurados são empregados para uma melhor remoção do acúmulo de meio de lapidação e material, promovendo sua retirada para fora do disco de lapidação.

Discos especiais de Cobre, Zinco-antimônio, piche ou resina sintética, revestidos com feltro ou outros materiais, toalhas e folhas de polimento também são definidos como ferramentas. Tais discos e equipamentos são empregados para casos de alta qualidade superficial, dificilmente obtidas através de processos convencionais de lapidação [1].

Outros discos de lapidação empregados na indústria são os discos bimetálicos. Nestes discos são embutidos cilindros ou ranhuras espiralares de materiais mais moles. Segundo Feld [9], estas combinações permitem tanto um aumento da produtividade quanto uma diminuição da rugosidade. Este cita que a produtividade de um disco de ferro fundido com aço é aproximadamente 30% maior que a de um disco só de ferro fundido.

### **3.3 CONSIDERAÇÕES BÁSICAS PARA A USINAGEM NA LAPIDAÇÃO**

A lapidação é um processo de usinagem com ferramenta de corte de geometria não definida. O conhecimento do mecanismo de atuação do grão abrasivo durante o processo de lapidação é importante para a otimização do processo, assim como para entender o mecanismo de desgaste, a usinabilidade e a tensão residual induzida em um material.

#### **3.3.1 - MODELOS DE REMOÇÃO DO PROCESSO DE LAPIDAÇÃO**

A remoção de material na lapidação ocorre devido ao movimento relativo entre ferramenta, peça e grãos abrasivos. Os grãos dispersos em um meio de suspensão (fluido de lapidação) agem de forma a atacar tanto a superfície da peça quanto a da ferramenta. Atuam

basicamente de duas maneiras, rolando entre peça e ferramenta ou fixos na ferramenta, promovendo o arrancamento de cavacos e deformando plasticamente a superfície da peça. Os grãos abrasivos, quando sobre carregamento, penetram de 5 a 15 % do seu tamanho na superfície da peça. Esta profundidade relativa depende principalmente da dureza do material da peça, da forma e da quantidade de grãos no meio, assim como do carregamento utilizado [1].

A figura 3.6 mostra os modelos de remoção na lapidação. Sob ação do grão 1, como consequência do rolamento e das altas pressões, o material da peça é apenas deformado elástica e plasticamente sem nenhuma formação de cavaco, obtendo-se assim um alisamento e um encruamento superficial. O material enfraquece até pequenas partículas se soltarem devido à fadiga [10].

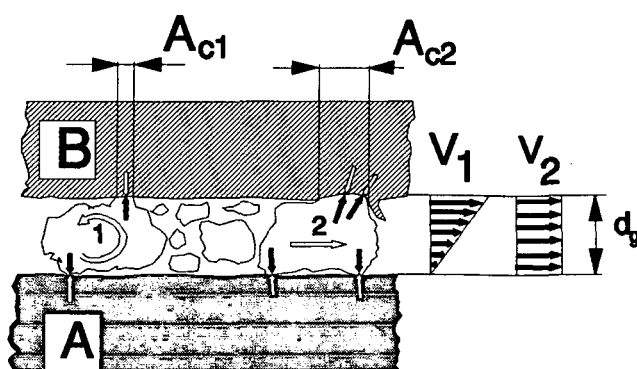


Figura - 3.6 : Atuação do grão na fenda de lapidação [10].

(A)-disco delapidação, (B) - peça, 1 grão rolante, 2 grão deslizante.

Já o grão 2 possui o mesmo tamanho que o 1, entretanto seu perfil não possibilita o deslocamento rotativo, ou está incrustado no disco de lapidação devido as altas pressões. De tal forma a remoção de material, ou mesmo o riscamento da superfície, acontece devido ao movimento de translação relativo entre a peça de trabalho e o grão abrasivo.

Segundo Grunwald [11], quando uma superfície é lapidada com baixa pressão, a remoção ocorre por rolamento e consequentemente a superfície apresenta-se fosca. Entretanto se a pressão for tão grande que cause o encrustamento dos grãos abrasivos no disco de lapidação a remoção ocorrerá principalmente por riscamento da superfície, apresentando assim uma superfície brilhosa.

Spur [2] apresenta um modelo em que os picos do grão são comprimidos na camada do material dúctil, levando à liberação de finas camadas do material da peça como resultado de uma deformação de cisalhamento microplástica repetitiva e contínua, excedendo a resistência do material, figura 3.7.

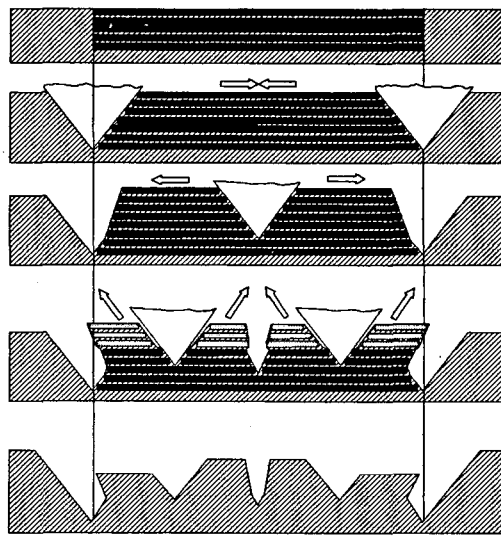


Figura - 3.7 : Modelo do mecanismo que ocorre em materiais metálicos na região de separação da camada superficial [2].

Na lapidação de cerâmicas, devido à sua incapacidade de sofrer deformação plástica, a penetração dos picos grão abrasivo leva, dependendo da intensidade de ataque ao destacamento de grãos inteiros da peça ou ao rompimento de partículas dentro dos grãos da peça, figura 3.8.

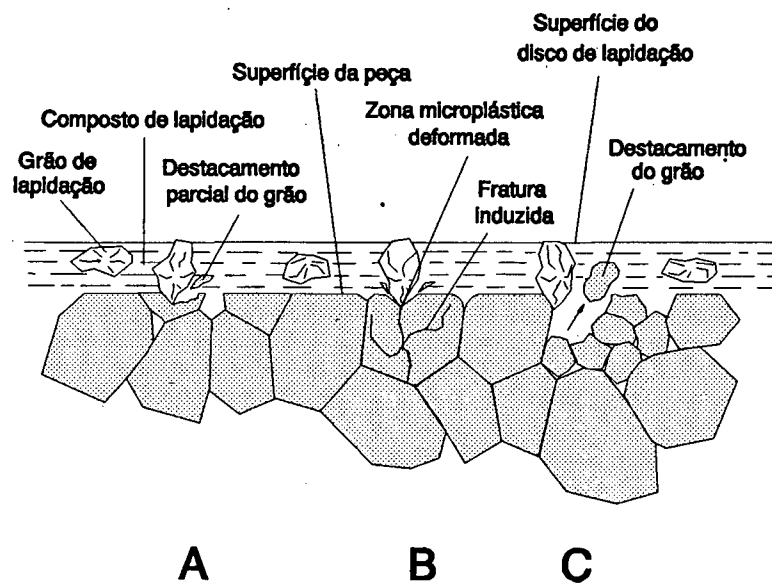


Figura - 3.8: Remoção de material pelo ataque do grão [2]:

- A) Destacamento de partícula do grão
- B) Indução de rachadura no grão
- C) Destacamento de grãos completos

Stahli [3], estima que atuam cerca de 200 a 300 mil grãos abrasivos por centímetro quadrado para um tamanho médio de grão de  $15\mu\text{m}$ . Entretanto a quantidade de grãos cortando ou rolando depende da especificação do grão, da viscosidade do meio de suspensão, da dureza do disco de lapidação e da peça [11]. A grande quantidade de grãos abrasivos atuando contra a superfície da peça leva a uma diminuição rápida dos picos de rugosidade no início do processo.

### 3.3.2 - USINABILIDADE

A usinabilidade (capacidade do material em se deixar usinar) é caracterizada por diferentes propriedades ou parâmetros do processo. Na lapidação estas são a força de corte, a taxa máxima de remoção, a rugosidade, a integridade superficial e a formação de trincas. Pode, também, ser definida como o quociente da área transversal de corte por grão pela força normal por grão. Na lapidação com pequenos tamanhos de grãos e baixas forças, apenas áreas transversais muito pequenas são obtíveis, com materiais de baixa dureza e usando grãos afiados as áreas de corte transversal são maiores [10].

### 3.2.3 - DESGASTE DOS GRÃOS NA LAPIDAÇÃO

De acordo com os modelos do processo de lapidação, onde o grão abrasivo rola ou só translada, ocorrem grandes pressões e temperaturas elevadas em pontos localizados. Devido a este estado pode-se observar uma fadiga térmica do grão abrasivo.

O desgaste tem início nas camadas cristalinas superficiais dos grãos abrasivos. Tais camadas estão sujeitas a pressões e temperaturas altas, que levam a fenômenos de difusão e oxidação, reduzindo a resitência abrasiva do material. A fadiga mecânica e térmica também responde por parte do desgaste dos grãos abrasivos.

Conhecendo-se a quantidade de grãos ativos no processo, pode-se chegar a conclusões sobre a quantidade de energia que cada grão absorve, concluindo assim sobre o fenômeno de desgaste do grão abrasivo durante o processo de lapidação [10].

### 3.2.4 - TENSÃO RESIDUAL NA LAPIDAÇÃO

A tensão residual na camada limite da peça é resultante da ação da:

1 - Tensão compressiva, que é resultado de um escoamento plástico provocado por um trabalho à frio, como no jateamento.

2 - Tensão de tração que é resultado de contrações diferenciadas quando a superfície de um corpo aquecido resfria mais rapidamente do que o substrato [12].

Num modelo o grão abrasivo pode ser aproximado por uma esfera. Se uma força normal  $F_{ng}$  atua sobre o grão, a tensão máxima não ocorre na superfície, mas sim na camada subsuperficial, figura 3.9 [10].

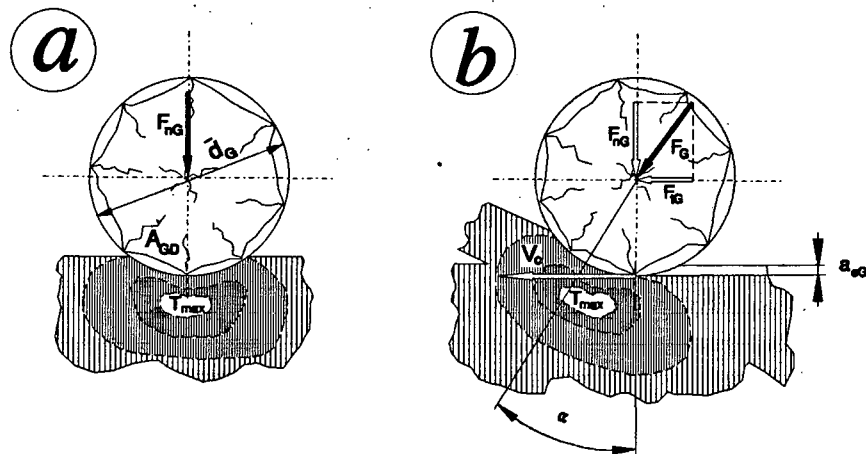


Figura - 3.9: Distribuição de tensões de cisalhamento e zona de deformação plástica [10].

a) grão parado, b) grão em movimento

1 - somente deformação elástica 2 - deformação elástica e plástica

A figura 3.10, mostra o gráfico da tensão residual em uma superfície de Ni-Zn, que foi lapidada utilizando-se um disco de lapidação de bronze empregando uma pressão de 0,07 MPa e um tamanho de grão de 3  $\mu\text{m}$  para a remoção de 6  $\mu\text{m}$  de material.

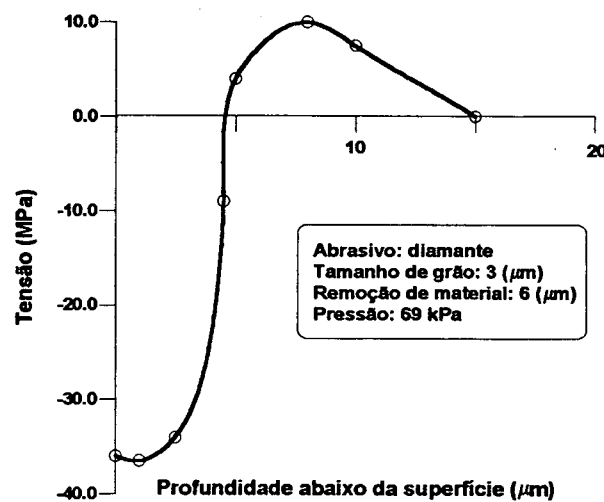


Figura 3.10 - Tensão residual em uma superfície de Ni-Zn [12].

A superfície apresenta tensão de compressão até aproximadamente 5  $\mu\text{m}$  e entre 5 e 15  $\mu\text{m}$  se tem tensão de tração com uma magnitude de 10,0 MPa [12].



### 3.4 - MEIOS DE LAPIDAÇÃO

Os meios de lapidação são diretamente responsáveis remoção de material. Sendo constituídos pelo meio de suspensão (fluido de lapidação) e pelo grão abrasivo. A escolha correta do tipo de abrasivo, do meio de lapidação, assim como da concentração do abrasivo no meio de lapidação dita a remoção e a característica superficial final da peça lapidada.

#### 3.4.1 - ABRASIVOS

Uma gama grande de abrasivos é utilizada nos processos de lapidação, e a sua seleção é feita de acordo com o material a ser lapidado e as características de qualidade e a remoção requeridas.

As principais características dos grãos abrasivos são o tamanho, a distribuição de tamanho, dureza, forma e número de quinas.

O pó abrasivo deve ser de mistura fácil com o fluido, não formando aglomerações e permanecendo suspenso por um tempo considerável não devendo decantar, antes do meio ser bombeado para a zona de lapidação [3]. Geralmente é empregado um agitador que evita a decantação do abrasivo.

Na tabela 3.1, são mostrados os campos de utilização para os materiais abrasivos mais comuns:

Tabela - 3.1: Materiais abrasivos e seus respectivos campos de emprego usuais [1].

| Material                                   | Emprego   |
|--|---|
| Carboneto de Silício (SiC)                 | Aços ligados e temperados, FoFo cinzento, vidro, porcelana          |
| Corindum (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | Aços moles, FoFo, metais leves e amarelos, carvão e semi-condutores |
| Carboneto de Boro (B <sub>4</sub> C)       | Metal duro, cerâmica  |
| Diamante                                   | Materiais duros e para polimento                                    |

## **- MATERIAIS ABRASIVOS**

Os materiais abrasivos mais empregados na lapidação são o carboneto de silício, o corindum, o carboneto de boro e o diamante. A seguir serão descritos as suas principais características e seu princípio de fabricação.

### **- Carboneto de silício**

O carboneto de silício (SiC) é um composto sintético, obtido em um forno de resistência elétrica através da fundição de uma mistura de areia de quartzo, carvão, serragem, e cloreto de sódio (NaCl). Sua dureza varia entre  $K_{100} = 2450$  e 3000. Podendo-se obter graus de pureza variados, qualidades e cores diferentes de acordo com o processo de obtenção.

Esse material abrasivo é utilizado na maioria das operações de lapidação, principalmente naquelas em que deve haver um baixo custo e uma rápida remoção de material e onde os requisitos de tolerâncias apertadas da peça são somente planicidade e precisão dimensional da peça [1,13].

### **- Corindum**

O corindum natural é composto por 80 a 95% de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ). Sua tenacidade é alta e sua dureza é aproximadamente  $K_{100} = 2050$ . Porém, este material apresenta uma quebra de grão que leva a contornos arredondados, com poucos gumes afiados.

O corindum sintético é composto por óxido de alumínio cristalino. Dependendo do percentual de óxidos estranhos, distinguimos entre corindum normal, semi-normal e nobre. No comércio é encontrado uma série de corinduns especiais [13].

O corindum é um material mais mole que o carboneto de silício, sendo geralmente usado na forma fundida. É indicado para melhorar o acabamento especialmente na lapidação de materiais moles, tais como aço doce e metais não-ferrosos.

Óxidos de alumínio não-fundidos são muito moles e desintegram-se facilmente a baixas pressões, não sendo portanto adequados quando é dada maior ênfase à remoção de material. No entanto, são de grande importância quando se deseja obter uma qualidade superficial

extremamente aprimorada [1].

#### **- Carboneto de boro**

O carboneto de boro ( $B_4C$ ) é um material sintético de custo mais elevado que o SiC ou  $Al_2O_3$ . Possui um tempo de vida longo e uma dureza maior que a do carboneto de silício ou do corindum. Consegue-se uma qualidade superficial melhor empregando-se carboneto de boro [1].

#### **- Diamante**

O diamante (C) é o material mais duro conhecido pelo homem ( $K_{100} = 5000$  a 7000). Possui um tempo de vida alto, devido ao seu baixo desgaste em relação aos abrasivos convencionais, porém o seu uso é bastante restringido devido ao seu altíssimo custo.

O diamante é geralmente usado na lapidação de pedras preciosas, na lapidação de carboneto de tungstênio e materiais cerâmicos. É também usado na lapidação fina, já que com pós de diamante o tempo necessário para a conclusão da operação está bem abaixo do tempo necessário para pós de abrasivos convencionais. O diamante permite não apenas a lapidação econômica de materiais duros mas também de outros materiais como alumínio e cobre, de forma econômica.

Na lapidação de materiais muito duros tem-se, por regra, o emprego de grãos de diamante [1;13;14].

#### **- Outros materiais abrasivos**

Além dos abrasivos acima descritos também têm sido usados para a lapidação a granada e a pedra de esmeril turca, todos com dureza menor do que o óxido de alumínio. Estes materiais quebram mais facilmente, assim tem-se como resultado um corte mais lento, com a tendência de produzir uma qualidade superficial melhor. Também tem-se notícias do uso de misturas especiais de  $Al_2O_3$  e  $ZrO_2$  na lapidação de silício para componentes eletrônicos, e óxidos de cério, como o  $CeO_2$ , usado na lapidação de peças de vidro e metal [15;33].

## - TAMANHO DE GRÃO

Desde a lapidação de debaste até o polimento, deve ser escolhido um tamanho de grão que proporcione as melhores taxas de remoção, de acordo com os requisitos de qualidade superficial da peça. O material da peça a ser lapidado também influi no tamanho de grão adequado ao processo, sendo que metais mais moles e não-ferrosos requerem um tamanho de grão mais fino, para produzir uma qualidade superficial similar àquela produzida em aços [13].

A tabela 3.1 mostra a classificação dos grãos de acordo com o padrão da FEPA. Os tamanhos de grãos mais usados são 400, 500 e 600. Para um dado tamanho de grão, a máxima variação não deverá exceder 20% do nominal. Partículas com tamanho maior que o nominal causam arranhões, e menores são apenas carregados pelo meio, sem realizar nenhum trabalho.

Tabela - 3.1 : Pós de lapidação classificada de acordo com o padronização FEPA [13].

| Código do grão | Tamanho médio do grão ( $\mu\text{m}$ ) | Limite inf. de tamanho (6%) | Limite sup. de tamanho (3%) |
|----------------|---|-----------------------------|-----------------------------|
| F 230/53       | 53.0                                    | 34                          | 82                          |
| F 240/45       | 44.5                                    | 28                          | 70                          |
| F 280/37       | 36.5                                    | 22                          | 59                          |
| F 320/29       | 29.2                                    | 16.5                        | 49                          |
| F 360/23       | 22.8                                    | 12                          | 40                          |
| F 400/17       | 17.3                                    | 8                           | 32                          |
| F 500/13       | 12.8                                    | 5                           | 25                          |
| F 600/9        | 9.3                                     | 3                           | 19                          |
| F 800/7        | 6.5                                     | 2                           | 14                          |
| F 1000/5       | 4.5                                     | 1                           | 10                          |
| F 1200/3       | 3.0                                     | 1                           | 7                           |

## - FORMA DE GRÃO

Para a obtenção de resultados ótimos na lapidação é necessário a utilização de uma forma de grão compacta. Tais grãos além de serem partículas de dimensões relativamente iguais, devem possuir gumes cortantes afiados.

Sobre o aspecto de seleção, a forma ótima de partícula é a de esfera. No entanto, as exigências que são feitas a um grão abrasivo na lapidação não são satisfeitas por essa forma, devido à tendência da mesma rolar entre peça e disco de lapidação. Apesar disso, um grão esférico, quando quebrado sob pressões bastante altas, adquirem uma ação de remoção cortante, devido a um eventual incrustamento no disco de lapidação.

Partículas em forma de agulha ou achatadas, com uma proporção comprimento / largura de 3:1, também apresentam um efeito de corte menor do que os elementos compactos e de dimensões iguais.

Entre as duas formas de grão acima descritas, esfera e agulha, situa-se a configuração de partículas caracterizada como compacta, de quinas e gumes afiados, a qual não apenas apresenta uma ação de remoção favorável, como também é facilmente selecionada [16].

A figura 3.11 mostra os grãos compactos (B) e os grãos menos favoráveis, achatados e em forma de agulha (A).

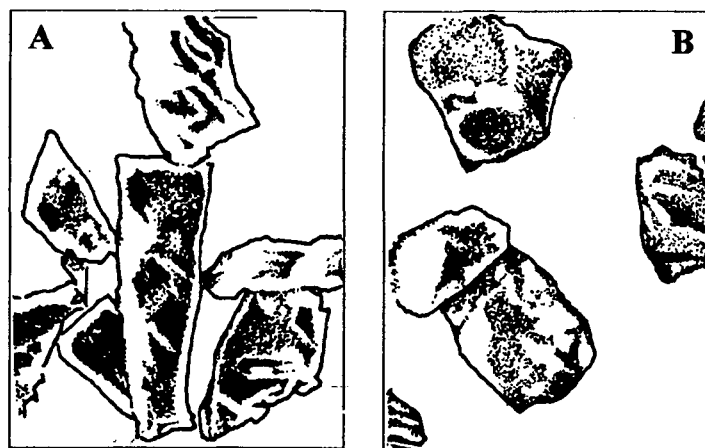


Figura - 3.11: Grãos achatados e em forma de agulha (A) e grãos compactos (B) [16].

A principal característica negativa do grão na forma extrema de agulha é que durante a lapidação suas longas extensões podem orientar-se na direção da peça, ocorrendo então o aparecimento de riscos profundos na superfície da peça. Em um grão compacto e uniforme, ao contrário, esse alinhamento é evitado, pelo fato do mesmo ter dimensões iguais independente de sua orientação.

A presença de grãos apenas um pouco mal formados pode provocar a mesma ação que a existência de partículas de tamanhos maiores, com todas as conseqüências decorrentes disso sobre a superfície da peça.

Portanto, para a obtenção de resultados ótimos na lapidação, é indispensável a utilização de grãos compactos, devendo ser evitadas as duas formas extremas, agulha e esfera.

A forma do grão abrasivo também tem grande influência no processo de seleção, pois grãos chatos ou em forma de agulha, devido à sua forma contrária à compacta, possuem velocidade de descida muito baixa durante a decantação, assim acabam depositando-se junto com as partículas finas [16].

### **3.4.2 - MEIO DE SUSPENSÃO**

Na lapidação utiliza-se um meio fluido para manter as partículas abrasivas em suspensão, o qual deve ser um produto com propriedades não-corrosivas e não-tóxicas, de fácil limpeza, pouco inflamável e com boas propriedades de refrigeração [1]. Deve-se usar o meio de suspensão de acordo com o tamanho de grão, pois se são utilizados grãos finos com um fluido com grande viscosidade, o filme de fluido formado será muito espesso dificultando a atuação dos grãos abrasivos na remoção da peça. Entretanto se a viscosidade for muito baixa, o filme de fluido será fino, podendo romper ocasionando o contato entre o disco de lapidação e a superfície da peça lapidada. Para granulometrias maiores recomenda-se o uso de fluidos mais viscosos do que os empregados com granulometrias finas [1]. A razão de mistura é de 1:10 a 1:5, ou de 100 a 200 gramas de pó abrasivo em 1 litro de fluido. Quando for usado água com aditivos anti-corrosivos, a razão de mistura pode atingir 1:3 [3].

Como meio de suspensão são usados óleos derivados de petróleo, parafina, óleos minerais, óleo de oliva, óleo de pé-de-boi, graxas e sabões. Estes, após o uso, muitas vezes podem ser integralmente reaproveitados, através da reciclagem do meio de lapidação por um processo de filtragem. Já o pó de lapidação, não pode ser reutilizado, devido ao desgaste dos grãos. A tendência moderna é cada vez mais utilizar-se água, com aditivos especiais, como meio de lapidação. Estes aditivos lhe conferem propriedades anti-corrosivas, aumento da viscosidade, da capacidade de lubrificação e de arraste. Verifica-se, com o uso deste meio de suspensão, um aumento de 10 a 15% na taxa específica de remoção, se comparado com os óleos anteriormente citados [1;24 ].

Atualmente encontra-se pastas abrasivas prontas para o uso (grãos abrasivos e meio de suspensão) como meio de lapidação.

### **3.5 - GRANDEZAS DE ENTRADA DO SISTEMA**

Com relação às suas influências sobre o processo de lapidação, as grandezas de entrada do sistema podem ser diferenciadas em grandezas do meio e do processo de lapidação

#### **3.5.1 - GRANDEZAS ESPECÍFICAS DO MEIO DE LAPIDAÇÃO**

São as grandezas relacionadas ao material, tamanho, faixa de variação do tamanho do grão, meio de suspensão e concentração que influenciam na remoção e na rugosidade da peça lapidada.

#### **- MATERIAL DO GRÃO ABRASIVO**

O carboneto de silício é geralmente empregado quando é exigida uma rápida remoção de material. O óxido de alumínio fundido, que é mais macio que o carboneto de silício, é usado para o melhoramento da qualidade superficial, especialmente na lapidação de metais moles tais como aço doce e metais não-ferrosos. As partículas de óxido de alumínio não fundido são muito macias, quebrando-se rapidamente quando sob pressão. Portanto, este material é ineficiente

quando se busca uma remoção eficiente da peça, por outro lado, é especialmente adequado para produzir qualidades superficiais extremamente boas. O carboneto de boro, é usado para se conseguir uma rugosidade melhor, entretanto é mais caro que o carboneto de silício e o óxido de alumínio. O diamante por ser o abrasivo mais duro, é usado geralmente para lapidar materiais de dureza bastante elevada. Outros abrasivos naturais, como a granada, o corindum natural e a pedra de esmeril turca têm sido usados na lapidação quando se deseja um acabamento melhor. Isso ocorre por serem materiais mais moles do que o óxido de alumínio sintético e, dessa forma quebram mais rapidamente [13].

Materiais abrasivos convencionais, por serem muito mais fracos e menos resistentes ao desgaste do que os grãos de diamante, têm um tempo de vida relativamente pequeno, o que se traduz em diminuição rápida da capacidade de remoção, a qual para os diamantes é bem maior [1]. O cegamento rápido dos gumes e quinas do grão também tem influências negativas sobre a qualidade superficial, já que em vez da ação cortante, por parte dos grãos, irá ocorrer uma ação atritante, que causa deformações na superfície da peça.

## **- TAMANHO DO GRÃO ABRASIVO**

O tamanho de partícula do meio de lapidação destaca-se como de especial influência sobre a remoção e a qualidade superficial, além de ser o parâmetro de entrada mais facilmente variável para a obtenção de modificações de resultado desejadas. Através de ensaios chega-se a um tamanho mínimo de grão para a lapidação de uma superfície, com o qual consegue-se remover a rugosidade existente e traços de uma operação prévia, alcançando uma alta qualidade superficial [1].

Como mostra a figura 3.12, aumentando-se o tamanho médio de grão abrasivo aumenta a capacidade de remoção, tomando-se por base a mesma quantidade do meio de lapidação.



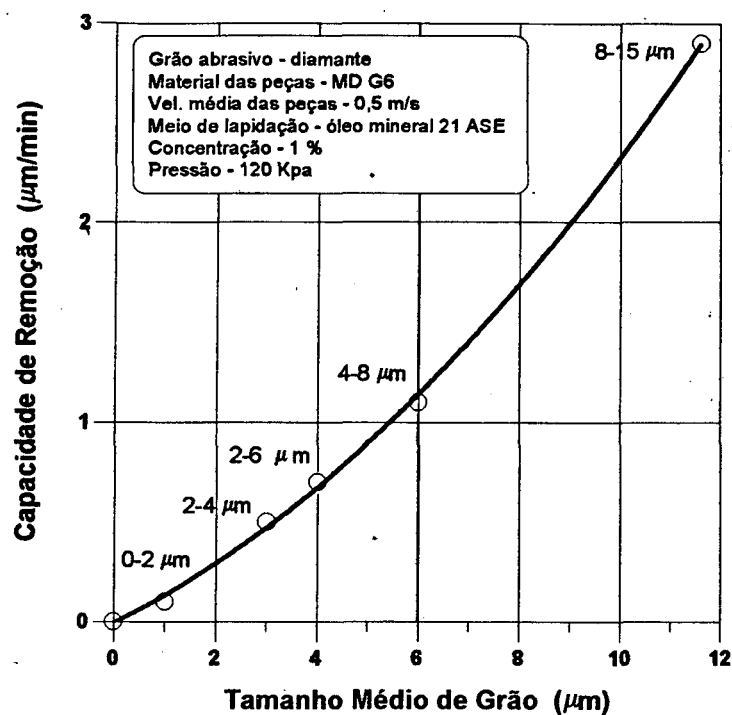


Figura - 3.12 : Capacidade de remoção em função do tamanho médio de grão [16].

A utilização de grãos finos conduz fundamentalmente a uma qualidade superficial melhor, figura 3.13. Isto se deve aos riscos menores produzidos na superfície da peça, por uma distribuição da pressão de lapidação sobre um número maior de pequenas partículas, gerando uma profundidade mínima de penetração. Assim, a qualidade superficial é melhorada devido à redução da rugosidade da peça, por ação de granulações mais finas [16].

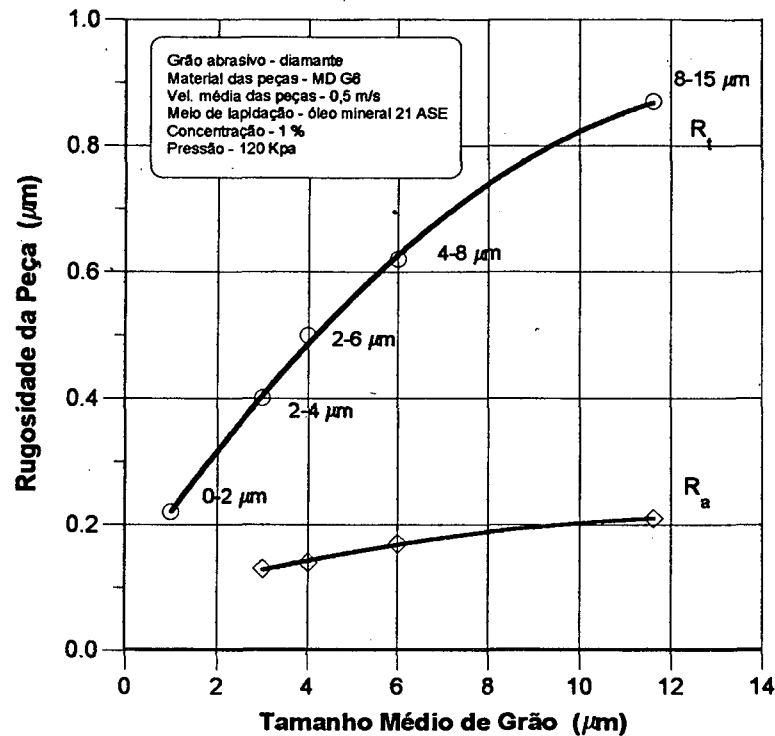


Figura - 3.13 : Qualidade superficial em função do tamanho médio de grão [16].

### FAIXA DE VARIAÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO

Segundo Stahli [3], para um dado tamanho de grão, a variação máxima não deverá exceder 20% do valor nominal do tamanho de grão. Grãos com tamanho maior que o tamanho nominal, causam arranhões, e os grãos com tamanho menor são simplesmente carregados pelo meio de suspensão sem remover material.

Para o ensaio da faixa de variação do tamanho de grão na lapidação de cerâmica por Davis [16], foram selecionados pós com tamanho médio de grãos de 15  $\mu\text{m}$  e faixas entre 1,5 a 29,5  $\mu\text{m}$ , 5 a 25  $\mu\text{m}$ , 10 a 20  $\mu\text{m}$  e 12 a 18  $\mu\text{m}$  com faixa de variação de tamanho de grão de 28, 20, 10 e 6  $\mu\text{m}$  respectivamente. Com isso na figura 3.14 é mostrado que com a diminuição da faixa de tamanho tem-se primeiramente uma diminuição da remoção na peça, ocorrendo novamente um aumento, até uma faixa com mínima tolerância.

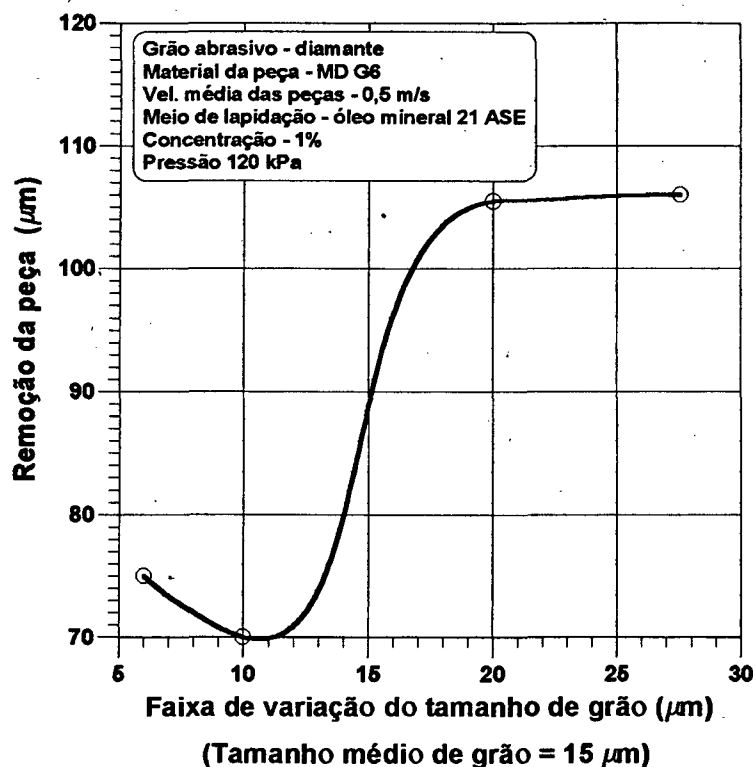


Figura - 3.14 : Remoção na peça em função da faixa de tamanho de grão de diamante [16].

Uma explicação para o comportamento acima descrito é que em uma faixa de tamanho maior, as partículas menores são impedidas de atuarem na usinagem pelos grãos de tamanho consideravelmente maior. Ao menos até o momento em que essas partículas maiores se quebrem.

Para faixas de tamanho estreitamente toleradas, a parcela de grãos pequenos que fica inativa é mínima, ao mesmo tempo em que o tamanho médio das partículas ativas também é menor, disso resultando um retrocesso da remoção. No entanto, a distribuição do tamanho é tão apertada que praticamente todos os grãos participam do processo, levando a um aumento da eficiência do meio de lapidação.

Com relação à qualidade superficial, os pós com estreitas faixas de variação de tamanho manifestaram-se claramente como os que resultaram nas maiores melhorias, conforme mostra a Figura 3.15. Essa dependência é óbvia, pois em faixas de tamanho com tolerâncias mais estreitas, os grãos de tamanhos maiores, que causam os sulcos mais profundos no perfil da superfície, são muito reduzidos, e disso origina-se a diminuição da rugosidade superficial [16].

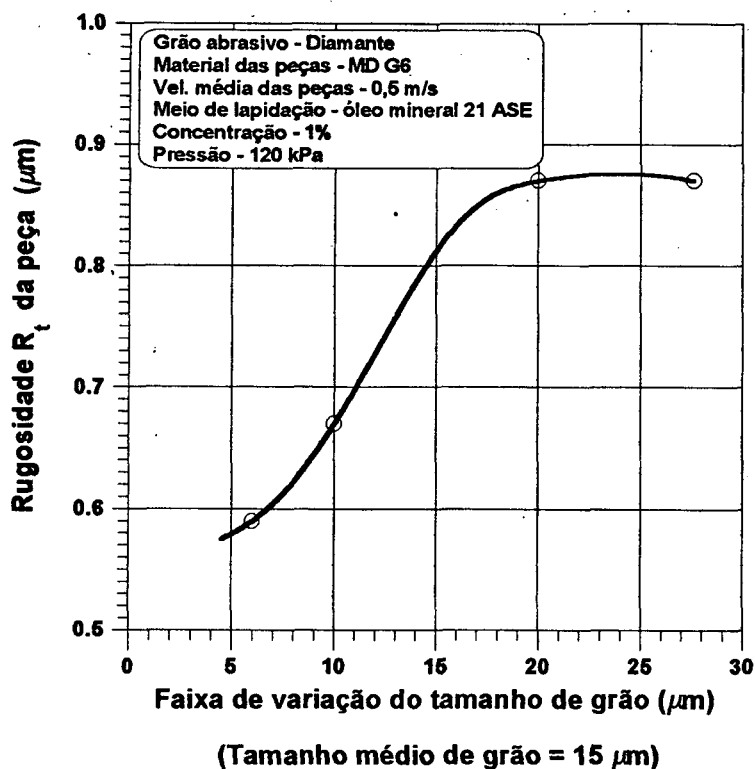


Figura - 3.15 : Rugosidade em função da faixa de tamanho de grão de diamante [10]

### - MEIO DE SUSPENSÃO

Como ocorre com o material do grão abrasivo, a influência do meio de suspensão sobre a taxa de remoção e a rugosidade da peça, depende do material da peça. Segundo Grunwald [11], na lapidação de aço 100 Cr 6 temperado, utilizando-se líquidos com diferentes viscosidades, pode-se afirmar que a maior taxa de remoção e a menor rugosidade foram obtidas utilizando-se querosene como meio de lapidação e óxido de alumínio como abrasivo. Na aplicação de líquidos com maior viscosidade, foram obtidos resultados inversos. Isto devido a diminuição do poder de ação dos grãos e mudanças do mecanismo de remoção, levando a uma diminuição da remoção, maior rugosidade e a uma superfície mais fosca. A máxima taxa de remoção, com grãos maiores até 45  $\mu\text{m}$ , foi alcançado com 100 Cr 6 utilizando-se querosene de baixa viscosidade. Entretanto, com o uso do óleo S16A de alta viscosidade, na lapidação de aço austenítico com grãos menores que 10  $\mu\text{m}$  e pressão de 0,04 N/mm<sup>2</sup> foram alcançados melhores resultados.

## - CONCENTRAÇÃO

Um aumento da concentração do pó no meio de lapidação leva a uma elevação da remoção na peça, até um valor de concentração ótimo, acima do qual a capacidade de remoção do meio de lapidação novamente diminui.

O retrocesso da remoção em concentrações muito altas, é por consequência da distribuição da pressão de lapidação sobre um grande número de grãos, através da qual uma movimentação por escorregamento e rolamento do grão é mais favorecida do que a ação de corte do mesmo [16]. A figura 3.16 mostra o gráfico da remoção em função da quantidade de abrasivo no meio de suspensão, para dois tipos de materiais e para duas pressões diferentes de lapidação [11].

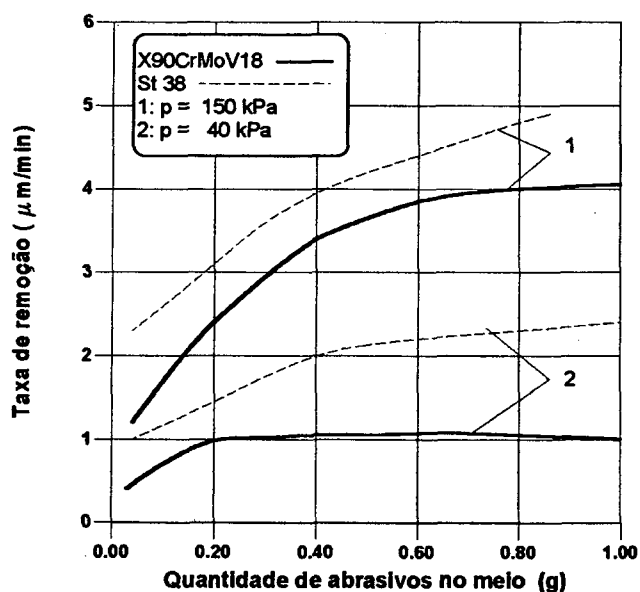


Figura - 3.16: Remoção de material em função da quantidade de abrasivo no meio de suspensão [11].

Já com vistas à qualidade superficial da peça, os melhores resultados são obtidos com mínimas concentrações e pressões. Isso pode ser explicado, pois o carregamento do grão aumenta com tal modificação, tendo a tendência de incrustarem-se no disco de lapidação, diminuindo o tamanho médio do grão. Aumentando ainda mais a pressão aumenta o carregamento em cada grão levando ao riscamento mais profundo da peça lapidada.

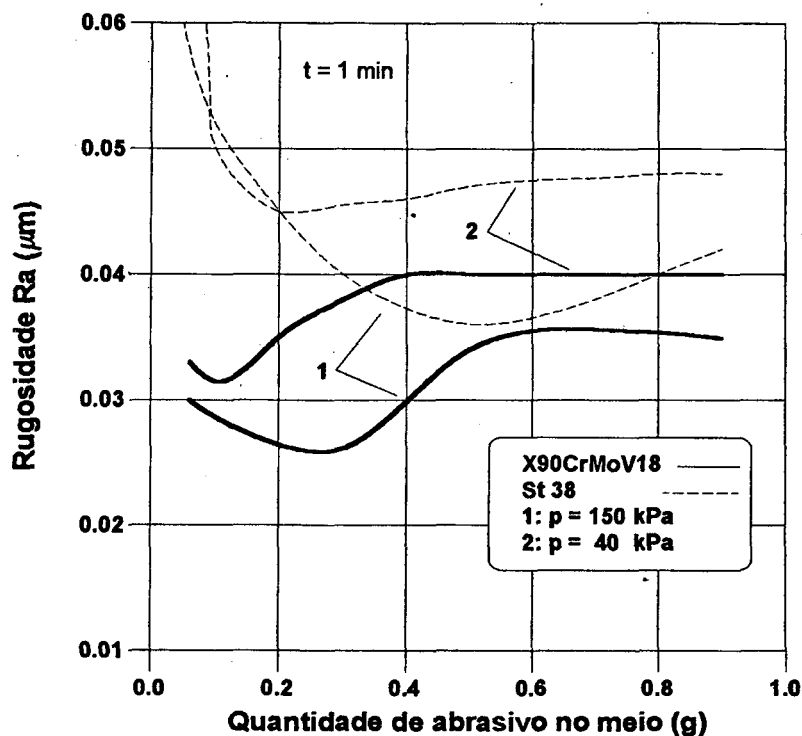


Figura - 3.17: Rugosidade Ra em função da quantidade de abrasivo no meio de suspensão [16].

Segundo König [1], em outros casos o aumento da concentração de grãos abrasivos está sempre correlacionado com o aumento da taxa de remoção. Ao mesmo tempo, verifica-se um aumento da rugosidade.

### 3.5.2 - GRANDEZAS ESPECÍFICAS DO PROCESSO

As grandezas específicas do processo estão relacionadas com a técnica de lapidação escolhida e independem do meio de lapidação. São elas disco de lapidação, velocidade, pressão e tempo.

#### - DISCO DE LAPIDAÇÃO

##### - Condição inicial do disco de lapidação

Grande cuidado deve ser dado à preparação do disco de lapidação, para assegurar superfícies limpas sem riscos ou sulcos. É fundamental evitar que impurezas permaneçam sobre

o disco, impedindo assim que elas danifiquem a superfície da peça durante a operação. Após cada ensaio, deve-se proceder a uma eficiente limpeza para remover todos os resíduos de processos anteriores, promovendo o afastamento de eventuais restos de pó abrasivo. Providência-se a seguir uma renovação da condição do disco de lapidação através de um pó fino de corindum, o qual, é friccionado sobre o disco. Posteriormente o disco é lavado com álcool etílico e tricloroetileno[16].

### - Material do disco de lapidação

Ensaio realizados com diversos materiais, tanto de discos de lapidação quanto de peças lapidadas, revelaram a tendência comportamental apresentada por estes elementos, figura 3.18. Com base nestes resultados é feita uma análise comparativa entre os diversos materiais empregados na fabricação dos discos de lapidação.

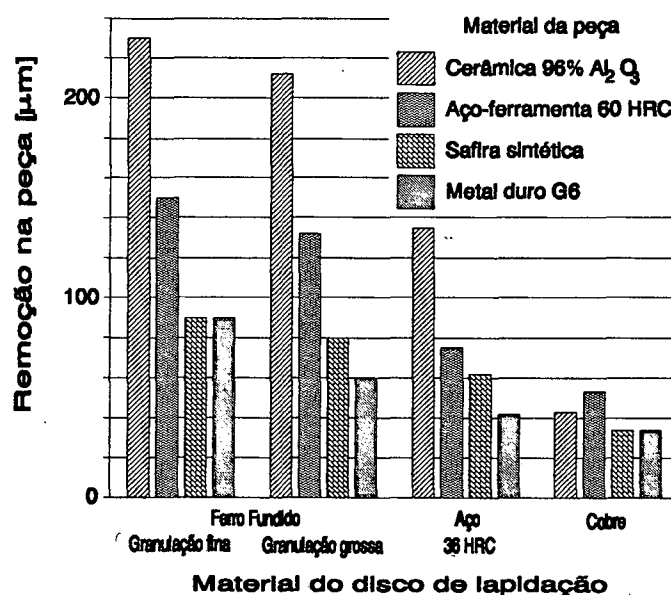


Figura 3.18 - Remoção na peça em função de diferentes materiais de disco de lapidação, com vários materiais de peça [16].

O fato de que, com o emprego do disco de cobre tenha-se uma remoção fundamentalmente menor, e a superfície da peça seja sempre melhor, é explicado pelo comportamento do grão de lapidação de incrustar-se bastante nesse material macio de disco. Desta forma resulta uma diminuição do tamanho da partícula atuante. Com o uso de discos de

ferro fundido ocorre uma elevação da remoção de material, superando até mesmo o desempenho dos discos de aço, figura 3.18. Disso pode-se concluir que os poros do material fundido causaram uma fixação, pelo menos temporária, dos grãos de lapidação, diminuindo o escorregamento e rolamento das partículas de pó.

Alcançou-se valores de remoção ainda maiores com o disco de ferro fundido de granulação fina, provavelmente porque os poros menores desse material reforçaram a tendência de fixação dos grãos [16].

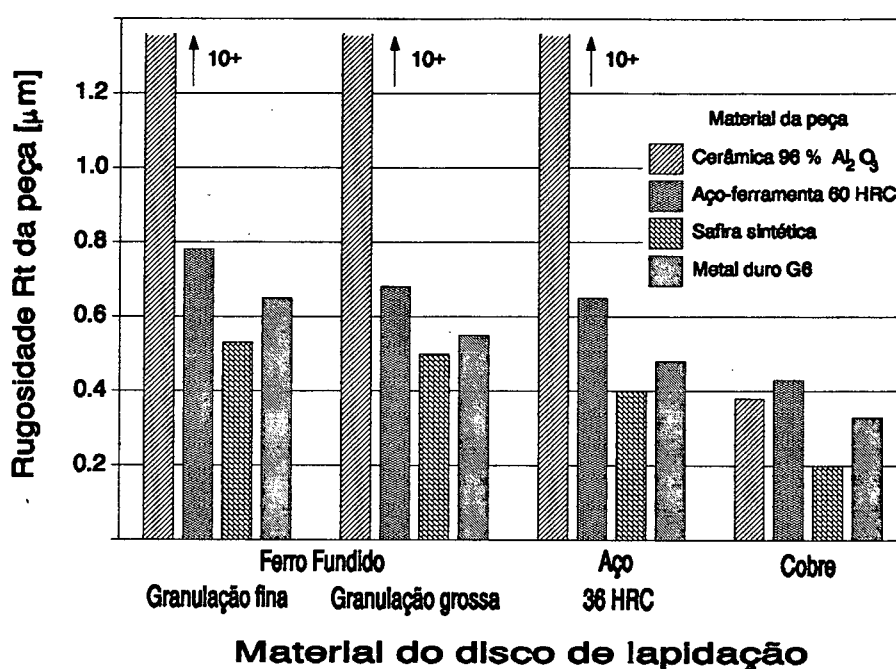


Figura 3.19 - Rugosidade Rt da peça com diferentes materiais de disco de lapidação, em função do tempo [16].

Com vistas à qualidade superficial, o disco de cobre foi o que levou aos melhores resultados. Com discos de lapidação de materiais muito duros, como por exemplo cerâmica ou aço endurecido, obtém-se uma remoção mínima e uma péssima qualidade superficial. Isto se deve a um grande número de partículas rolantes e deslizantes, principalmente em se tratando de grãos de configuração geométrica inadequada.



O emprego de discos de lapidação muito macios transforma o processo de lapidação em uma operação de polimento, com carregamentos muito pequenos sobre os grãos abrasivos isolados, o que implica em uma pequena taxa de remoção. Dessa forma deduz-se, como a melhor forma para a obtenção de uma capacidade de remoção suficiente, a utilização de discos de materiais porosos, como por exemplo os ferros fundidos.

A dependência dos resultados da lapidação aos materiais de disco de lapidação utilizados é evidenciada como de muita importância. A regra empírica, vigente na indústria, de que quanto mais duro o disco tanto maior será a remoção, é basicamente confirmada, com a restrição de que discos extremamente duros e espessos, sob condições de lapidação normais, não levam necessariamente às capacidades de remoção absolutamente mais altas. Com relação à qualidade superficial, obtém-se a melhor qualidade com os discos mais macios [16].

#### **- ALIMENTAÇÃO E QUANTIDADE DO MEIO DE LAPIDAÇÃO**

Com o decorrer do tempo, os resíduos resultantes da remoção do processo permanecem no meio de lapidação e o contaminam cada vez mais, de modo que os efeitos de refrigeração e lubrificação do meio de suspensão são continuamente reduzidos.

O decréscimo da capacidade de remoção, condicionado sobretudo pela fratura de grão, é compensado através da condução renovada e contínua do meio de lapidação. No entanto, a melhora da qualidade superficial da peça também é reduzida, porque o tamanho médio de grão do pó de lapidação permanece inalterado.

É usual alimentar o meio de lapidação, composto de pós de material menos resistente, de forma contínua sobre o disco de lapidação. Este procedimento evita a perda da capacidade de remoção do meio de lapidação e deformações na superfície da peça. Por outro lado, a alimentação contínua também tem a finalidade de equiparar a ação de remoção dos grãos, pois devido ao carregamento ocorre fratura resultante da fragilidade dos mesmos.

Já na utilização de pós de diamante, a necessidade de suprimento de meio de lapidação, é essencialmente menor, e o preenchimento do disco de lapidação deve ocorrer apenas de tempos em tempos, de acordo com a respectiva tarefa.

Uma quantidade relativamente grande de meio de lapidação deve, a princípio, contribuir para que se mantenham mínimas as influências de impurezas sobre a qualidade superficial da peça, que podem se fazer notar através da fricção do disco de lapidação e também dos produtos da remoção.

Na alimentação do meio de lapidação é importante uma uniformidade na aplicação. Nos casos específicos em que se utilize uma base de polimento absorvente, por exemplo um tecido, essa uniformidade pode ser garantida através de borrifadores. Dessa forma se obtém uma homogeneidade especial do pó, do meio de refrigeração e lubrificação, sobre a superfície do disco de lapidação.

Para evitar uma perda do meio de lapidação através das forças centrífugas atuantes pela rotação do disco, utiliza-se, por exemplo, um raspador de borracha, que cobre a lateral externa do disco de lapidação e o reconduz de volta ao disco de lapidação. A falta de meio de lapidação pode causar sérias consequências sobre a superfície da peça [1].

## **- TRAJETÓRIA E VELOCIDADE DE LAPIDAÇÃO**

Com o aumento da trajetória de lapidação de um ponto da peça, mantendo-se constantes os outros parâmetros, ocorre um aumento da remoção. O aumento deste comprimento de trajetória é possível através do aumento do tempo de lapidação ou através do aumento da velocidade. O aumento da velocidade para um determinado comprimento de trajetória não influencia a remoção e a qualidade superficial, permanecendo constante em função da granulometria do abrasivo, figuras 3.20 e 3.21 [11].

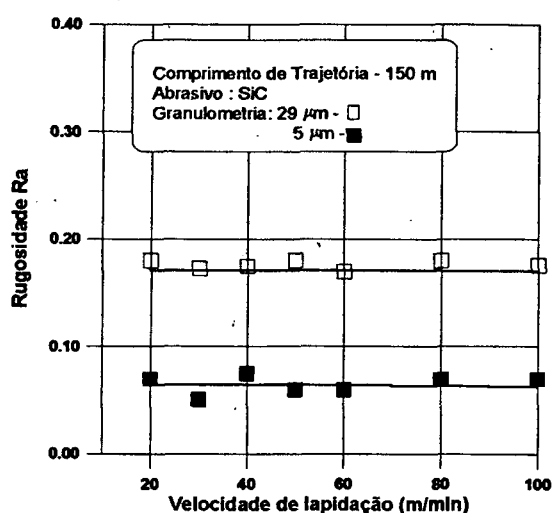


Fig. 3.20 : Ra em função da velocidade de lapidação [11].

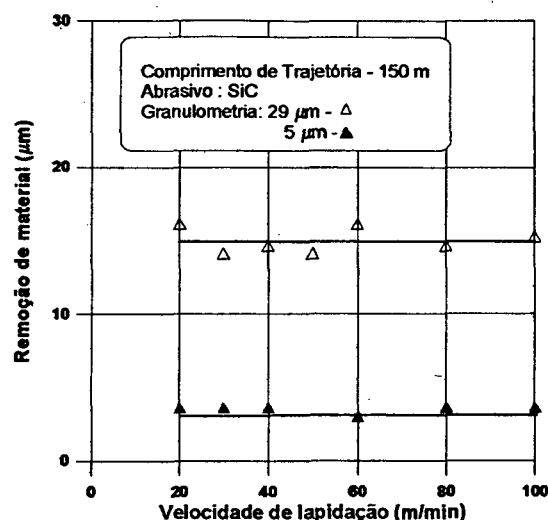


Fig. - 3.21 : Remoção em função da velocidade de lapidação [11].

Entretanto, König [1] afirma que para o mesmo tempo de lapidação, o aumento da velocidade exerce influência sobre a taxa específica de remoção, pois quanto mais rápido gira o disco de lapidação, mais rapidamente rolam os grãos abrasivos entre a peça e o disco. Assim a frequência com a qual, cada grão pressiona a superfície da peça é maior aumentando proporcionalmente com a elevação da velocidade. Na mesma proporção aumenta a taxa de remoção.

Apesar da taxa de remoção apresentar uma elevação com o aumento da rotação do disco de lapidação, existem limites para a rotação do disco, pois as forças centrífugas fazem com que o meio de lapidação seja rapidamente removido da região de trabalho para a periferia do disco. As velocidades ideais para os discos de lapidação são determinadas pelos diferentes tipos e tamanhos de máquinas. A maioria das máquinas oferece um campo amplo de rotações, algumas delas continuamente ajustáveis, para diversos casos de aplicação. Na lapidação fina com sobremedidas de material menores que 0,03 mm, as velocidades de corte são muito baixas, situando-se entre 4 e 5 m/min. Já para a lapidação de desbaste, sobremedidas de material acima de 0,5 mm estas velocidades encontram-se entre 250 e 380 m/min, ocasionando alta geração de calor [17].

## - PRESSÃO DE LAPIDAÇÃO

Também a pressão de lapidação é uma variável que influencia os resultados de trabalho. O seu significado para a taxa de remoção é maior que a ação de grãos grandes. Foi verificado que enquanto o aumento da taxa de remoção, com o aumento do grão abrasivo  $d_G$ , é aproximadamente proporcional ao valor da  $\sqrt{d_G}$ , o aumento da taxa de remoção com o aumento da pressão de lapidação é hiperproporcional [1;13].

A figura 3.22, mostra que a remoção para mesmo tempo de lapidação, até uma pressão de 160 kPa aumenta constantemente, ao passo que um aumento da pressão de lapidação acima de 16 kPa leva a uma diminuição subsequente da remoção.

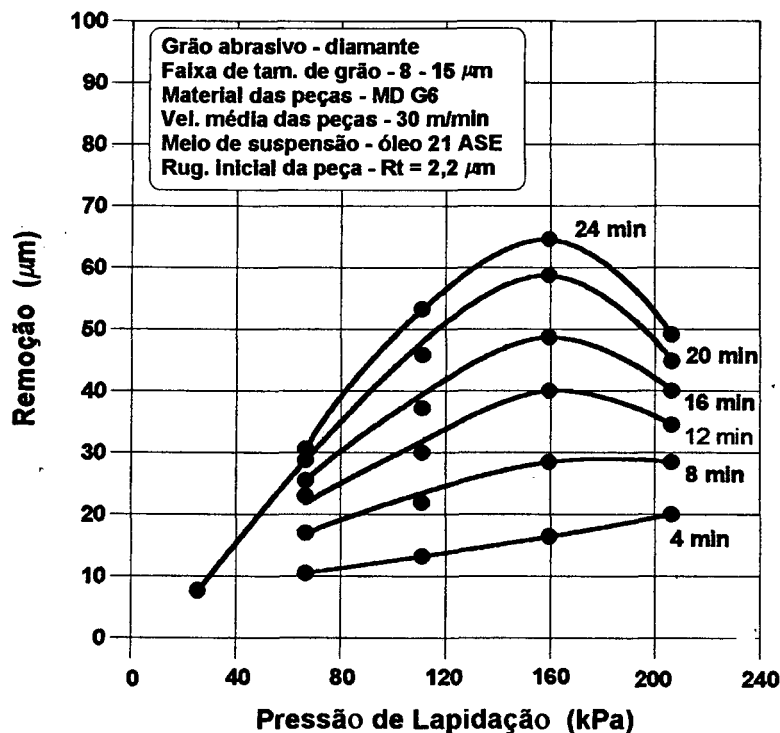


Figura - 3.22 : Influência da pressão de lapidação sobre a remoção [1].

Esta forma de curvas é decorrente do colapso do processo, pois ao atingir-se uma certa pressão, a tendência dos grãos se embutirem no disco ou fraturarem aumenta tanto que a remoção global sofre uma diminuição. Além disso, não é mais possível a remoção dos grãos gastos e dos cavacos existentes na região de trabalho. Portanto no processo de lapidação existe uma pressão

ótima que, considerando-se os aspectos econômicos, não deve ser ultrapassada. Davis [16] menciona que a diminuição da taxa de lapidação, principalmente devido ao desgaste e quebra dos grãos, poderia ser evitada se fosse possível garantir a alimentação contínua do meio de lapidação. No entanto, deve-se considerar que com isto se tem uma diminuição da qualidade superficial, pois a redução da granulometria estaria sendo evitada [1].

O valor da pressão a ser aplicada depende do material a ser lapidado, do grau de corte desejado e do acabamento especificado. Quando a lapidação é feita com abrasivos soltos ou compostos preparados, a pressão varia de 7 a 21 kPa para materiais moles, incluindo metais não ferrosos e ligas, e acima de 70 kPa para materiais duros.

Altas pressões removem material mais rapidamente, no entanto, causam rápida quebra dos grãos e aumentam a possibilidade de riscos na peça. Baixas pressões dão resultados mais precisos e são empregados no acabamento. Uma pressão constante dá o melhor resultado, exceto nos casos em que são usados couro ou tecido como materiais do disco, afim de proporcionar diferentes pressões nos picos e vales de uma superfície, para torna-la mais plana com diferentes remoções localizadas [13].

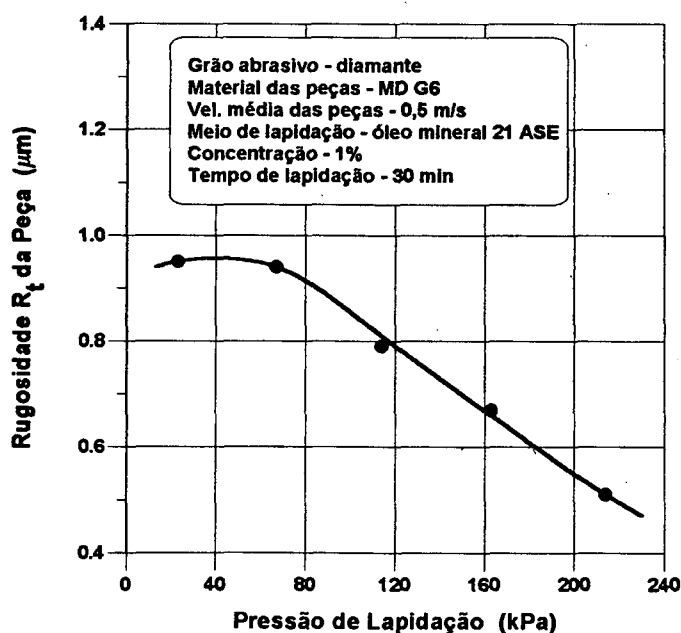


Figura- 3.23 : Rugosidade da peça em dependência da pressão de lapidação [16].

Como pode-se interpretar da figura 3.23, a qualidade superficial alcançável da peça em 30 min de trabalho melhora rapidamente com o aumento da pressão de lapidação. Causas para isso são as fraturas de grãos e a tendência crescente das partículas de pó, sob altas pressões, de incrustarem-se no disco de lapidação. Como regra, isto aumenta o efeito de uma redução do tamanho de grão atuante de lapidação. Deve-se empregar grãos abrasivos com a granulometria mais uniforme possível, para que não seja preciso aplicar um aumento de pressão, para se conseguir intensificar o embutimento dos grãos maiores no disco e, deste modo, obter uma homogenização da granulometria.

Grünwald [11] lapidando aço 100 Cr 6, observou que existe uma faixa de pressão ótima na qual a rugosidade é minimizada.

### **- TEMPO DE LAPIDAÇÃO**

Um fator primordial do processo de lapidação, tanto sob o aspecto de produtividade como o de custos, é o tempo necessário para se obter uma certa qualidade superficial.

Para o caso da alimentação não contínua do meio de lapidação, a capacidade de remoção diminui com o tempo. Isso ocorre pelo fato que os resíduos resultantes da remoção no processo de lapidação permanecem no meio de lapidação e o contaminam com o passar do tempo, de modo que suas propriedades de refrigeração e de lubrificação são continuamente reduzidas. A adição esporádica de um meio de lubrificação no disco de lapidação poderia levar a um aumento parcial da capacidade de corte. Essa providência tem um efeito limitado, pois as partículas de diamante quebram-se e é atingido um ponto onde, para obter a recuperação da capacidade de remoção, deve-se conduzir novo meio de lapidação [16].

### **3.6 - FATORES INFLUENTES SOBRE A PRECISÃO DE FORMA NA LAPIDAÇÃO DE PEÇAS PLANAS**

O baixo erro de forma (planidade e paralelismo) obtenível na lapidação plana é uma das principais características do processo. O movimento relativo entre a peça e o disco de lapidação acontece de modo que o grão abrasivo atua tanto na remoção de material da peça quanto do disco

de lapidação, influenciando tanto o erro de forma da peça quanto do disco. O erro de forma da peça é influenciado principalmente pela cinemática do processo, pela pressão entre a peça e o disco de lapidação e o erro de forma inicial do disco de lapidação. Enquanto que o erro de forma do disco é influenciado principalmente pela cinemática do processo e a disposição das peças na gaiola.

### 3.6.1 INFLUÊNCIA DA PRESSÃO SOBRE A PRECISÃO DE FORMA

A pressão de lapidação, segundo Bodrich [18], é um dos fatores de influência da precisão de forma, pois sua distribuição não homogênea sobre a superfície de trabalho causa a remoção preferencial na peça, influenciando o erro de planicidade.

Para a entrada do grão abrasivo na fenda de lapidação são necessárias 3 grandezas relacionadas entre si: rugosidade do disco de lapidação  $R_s$ , rugosidade da peça  $R_w$  (estas alcançando no máximo valores de  $R_t$ ) e o tamanho do grão  $T_g$ . Se a soma dessas grandezas ultrapassar a um determinado valor, caracteriza-se assim a entrada do grão na fenda de trabalho. A equação 1 expressa tal relação que é influenciada principalmente pelo tamanho de grão.

$$R_s + T_g + R_w \geq C \quad (1)$$

O carregamento sobre cada grão é influenciado pela pressão de lapidação e a concentração no meio de lapidação. Grãos de tamanho maiores que o tamanho médio atuam na remoção de material mais intensificada na borda da peça, influenciando no erro de planicidade. Aumentando-se a pressão de lapidação, a espessura da fenda diminui, aumentando a solicitação sobre os grãos e a trajetória percorrida até a quebra do grão diminui, diminuindo o erro de planicidade. Com uma pressão de lapidação de 16 kPa, utilizando-se um abrasivo com tamanho médio de grão de 40  $\mu\text{m}$ , obteve-se erros de planicidade na ordem de 4  $\mu\text{m}$ , aumentando-se para 50 e 75 kPa obteve-se respectivamente erros de planicidade de 3 e 0,5  $\mu\text{m}$ . Não se deve acreditar porém que aumentando-se a pressão de lapidação sempre ocorre a diminuição do erro de planicidade. [18].

Outro fator que ocasiona erro de planicidade devido a distribuição de pressão é a componente da força que atua sobre a peça, figura 3.24.

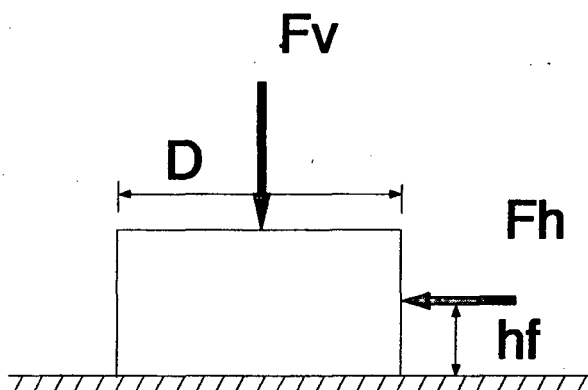


Figura - 3.24: Esquema da atuação das forças sobre a peça na lapidação [18].

Pelo fato que as peças executam um movimento relativo ao disco de lapidação, além da componente de força  $F_v$  na direção vertical, atua ainda uma força horizontal  $F_h$ , equação 2, onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre a peça e o disco de lapidação e depende principalmente do meio de lapidação.

$$F_h = \mu \cdot F_v \quad (2)$$

Esta força horizontal tem como consequência que, em função da altura do ponto de aplicação, ocorre o aumento ou a diminuição da pressão de lapidação na parte oposta da peça. Um posicionamento inadequado da peça sobre o disco de lapidação ou carregamento mal distribuído resulta numa distribuição não homogênea da pressão, ocorrendo assim uma remoção preferencial na borda da peça.

Bodrich [18] afirma que na pior das hipóteses, a ação da força e a entrada unilateral dos grãos na peça, aumenta a remoção na periferia não mais que 10% em relação à remoção total da peça.



### 3.6.2 - INFLUÊNCIA DO ERRO DE FORMA DO DISCO SOBRE O ERRO DE FORMA DA PEÇA.

Segundo Bodrich [18], discos de lapidação concavos resultam em peças com superfícies convexas, enquanto que discos convexos necessariamente não levam a superfície concava da peça. Condições ideais de lapidação são obtidas quando o disco de lapidação continua plano durante o desgaste.

Hansch [19] realizou ensaios para determinar a influência do erro de forma do disco de lapidação sobre o erro de forma da peça. Partindo-se de um perfil do disco de lapidação mais desgastado na região central, foi escolhida uma cinemática que mudasse a forma do perfil do disco. A figura 3.25 mostra a evolução do desgaste do disco de lapidação.

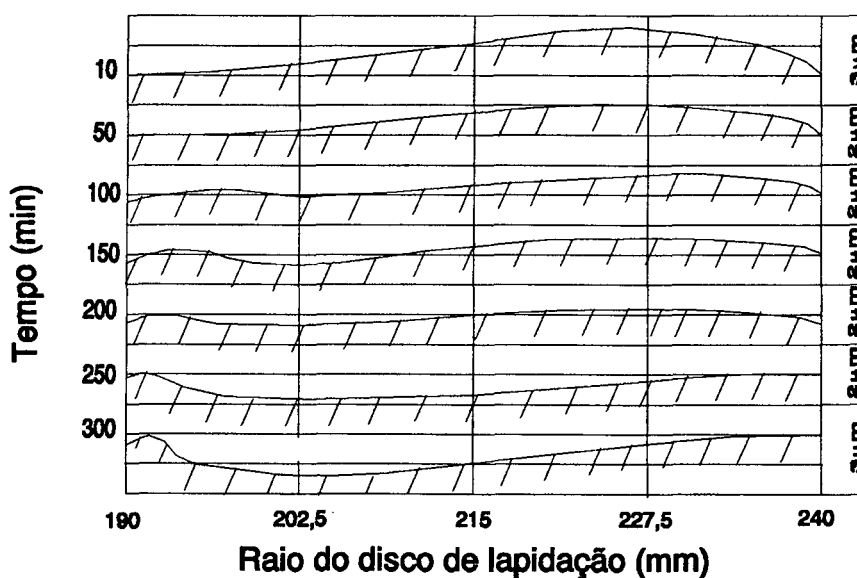


Figura - 3.25: Desgaste do disco de lapidação ao longo do tempo [19].

O erro de forma do disco e da peça ao longo do tempo é mostrado na figura 3.26. Um perfil aproximadamente plano do disco de lapidação é obtido com cerca de 170 min de lapidação, onde é obtido, também, o menor erro de planicidade para a peça lapidada. A partir deste tempo o disco começa a ter outra característica de perfil, aumentando o erro de planicidade associado à peça lapidada.

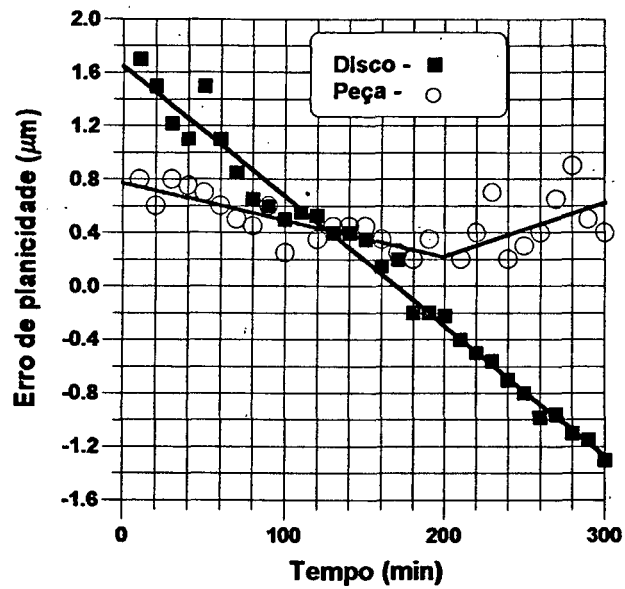


Figura - 3.26: Erro de planicidade do disco de lapidação e da peça em função do tempo [19].

A figura 3.27, mostra a relação entre o erro de forma da peça e do disco. Pode-se notar a tendência da diminuição do erro de forma da peça com a diminuição do erro de forma do disco de lapidação. Onde a melhor característica de planicidade da peça está condicionada ao menor erro do disco de lapidação.

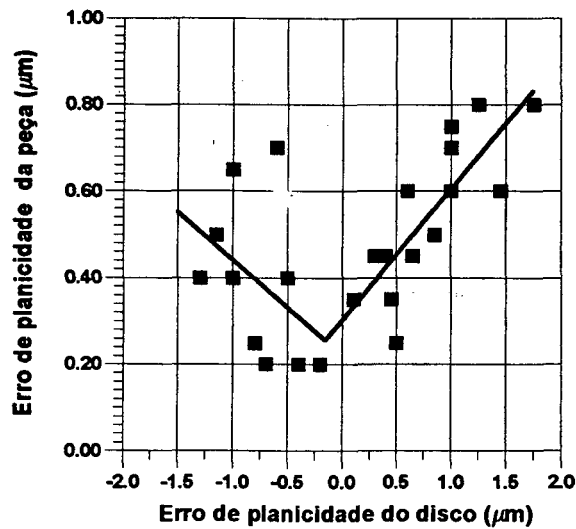


Figura - 3.27: Erro de planicidade da peça em função do erro de forma do disco de lapidação [19].

### 3.6.3 - INFLUÊNCIA DA CINEMÁTICA SOBRE A PRECISÃO DE FORMA DAS PEÇAS.

Pontos da peça com diferentes posições do centro da gaiola possuem velocidades diferentes, e consequentemente percorrem comprimento de trajetórias diferentes. Uma vez que a remoção de material é proporcional ao comprimento de trajetória, a peça tende a se apresentar com regiões mais e menos desgastada. As diferentes taxas de remoção influem assim nos erros de planicidade e paralelismo das peças.

Bodrich [18] apresenta um modelo de remoção de material da peça em função de sua posição na gaiola, figura 3.28. Este modelo é apresentado para uma lapidadora com acionamento por engrenamento externo conforme foi mostrado no capítulo 3.2.2, figura 3.3.

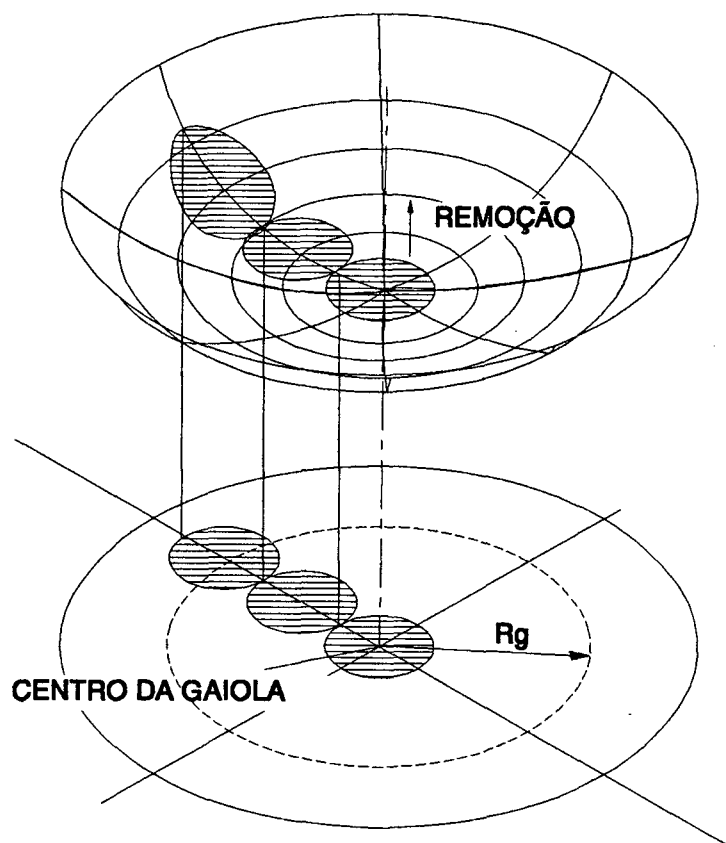


Figura - 3.28: Diagrama de remoção, para uma lapidadora planetária [18].

Este gráfico de remoção apresenta uma superfície cônica, onde à medida em que se distancia do centro da gaiola, a remoção aumenta. Com isto peças posicionadas com diferentes distâncias do centro da gaiola apresentam erros de planicidade e paralelismo distintos. Peças posicionadas mais na periferia da gaiola, tendem a apresentar um erro maior de paralelismo, se não puderem girar na gaiola.

Segundo Bodrich, para uma remoção homogênea, deve-se procurar uma relação pequena entre diâmetro da peça e comprimento da trajetória.

### 3.7 - EQUACIONAMENTO DA REMOÇÃO

O modelo matemático da remoção, através das grandezas que influem no processo objetiva a minimização do tempo da lapidação de desbaste e acabamento, buscando alcançar os melhores resultados quanto aos erros de forma, medidas e qualidade superficial final das peças. São descritos a seguir dois modelos de remoção de material. O primeiro utiliza a integração da velocidade de um ponto e o segundo a análise dimensional.

#### 3.7.1 - ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DE VELOCIDADE PONTUAL DA PEÇA

Para o modelamento da remoção, Orlov [20] divide a superfície da peça e do disco de lapidação em superfícies elementares. O modelo de remoção para um elemento da superfície é dado pela equação 3.

$$R = C_1 \int_0^t K_i(v, a_t, p, h, S) \cdot v(t) \cdot dt \quad (3)$$

A intensidade da remoção de material  $K_i(v, a_t, p, h, l)$  da peça e do disco é uma função da velocidade "v", da aceleração tangencial relativa " $a_t$ ", da pressão de contato "p", da espessura do filme de lapidação "h" na fenda de trabalho, e do comprimento de trajetória "S" da superfície elementar. O fator de proporcionalidade  $C_1$  depende da grandeza  $K_i$  e considera a influência de outros fatores do processo. A intensidade de remoção do material pode ser determinada através da determinação de três fatores: pressão, velocidade e espessura do filme.

Por razões práticas a função da intensidade pode ser aproximada à formula de Taylor para algumas funções variáveis. Uma aproximação pode ser feita considerando as derivadas de primeira ordem para a intensidade de remoção de material, equação 4.

$$R(v, a, p, h, S)|_t \approx K_{io}(v_0, a_0, p_0, h_0, S_0, t_0) + \frac{\partial K_{io}}{\partial v_0}(vt - v_0) + \frac{\partial K_{io}}{\partial a_0}(at - a_0) + \frac{\partial K_{io}}{\partial p_0}(pt - p_0) + \frac{\partial K_{io}}{\partial h_0}(ht - h_0) \quad (4)$$

A determinação de  $K_i$  é obtida através da análise dos resultados experimentais, levantando-se a curva da taxa de remoção em função da velocidade. A tangente a esta curva é a intensidade de remoção  $K_i$ , conforme mostra a figura 3.29.

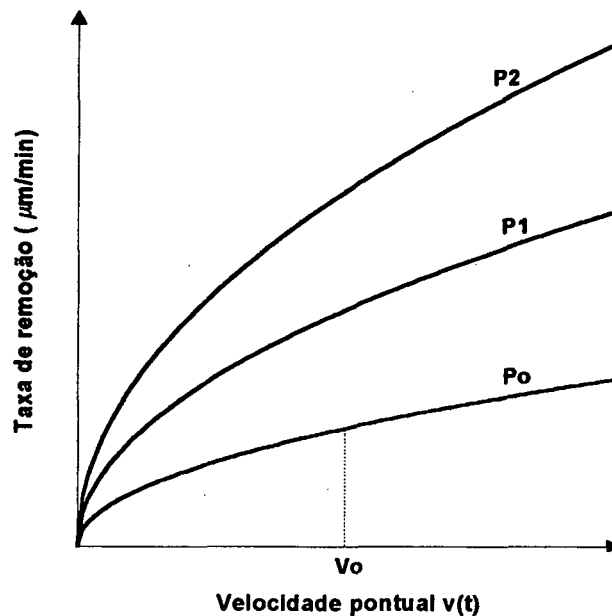


Figura - 3.29: Remoção em função da velocidade para diferentes condições.

O coeficiente angular da reta tangente no ponto  $v_o$ , para as condições genéricas  $a_o$ ,  $P_o$ ,  $h_o$  e  $S_o$ , determina a intensidade de remoção de material nestes pontos, consequentemente a parcela de  $K_{i0}$  na equação 4. As outras parcelas das derivadas parciais podem ser obtidas levantando-se os gráficos da intensidade de remoção  $K_i$  em função da velocidade, conforme a figura 3.30.

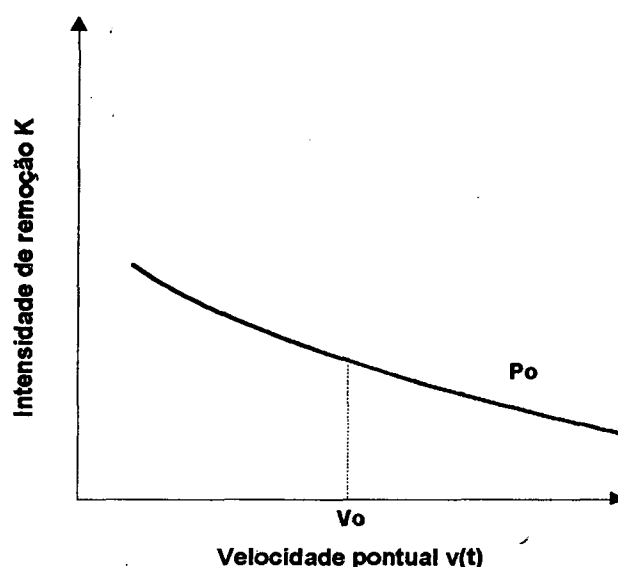


Figura - 3.30: Intensidade de remoção em função da velocidade pontual.

A derivada da intensidade de remoção em relação a velocidade no ponto  $v_o$  obtém a inclinação da reta tangente neste ponto. O mesmo procedimento deve ser feito para determinar a derivada parcial da intensidade de remoção em função dos outros parâmetros e com isso determinar a equação da intensidade de remoção.

O coeficiente de proporcionalidade  $C_1$  pode ser obtido através do ajuste final da equação de remoção calculada com os resultados experimentais.

### 3.6.2 - ATRAVÉS DA ANÁLISE DIMENSIONAL

Outro modelo utilizado para equacionar a remoção é obtido por Enger [21] através da análise dimensional. A partir deste método é possível, com um número mínimo de experimentos,

determinar em função da variação dos parâmetros tecnológicos: pressão, velocidade, tamanho de grão e quantidade do meio de lapidação. Utilizando-se o teorema dos PI de Buckingham qualquer comparação entre as grandezas físicas na forma de uma função matemática adimensional, vinda das grandezas dos produtos de potências  $\Pi_1 ; \Pi_2 , \dots , \Pi_n$  em que  $F( \Pi_1 , \Pi_2 , \dots, \Pi_n )= 0$  é empregada.

Em função de alguns parâmetros, para uma determinada área da peça e tempo de lapidação, Enger gerou 3 produtos adimensionais:

$$\Pi_1 = \frac{a.v}{p} \quad (5)$$

$$\Pi_2 = \frac{Tg.p}{l.v^2} \quad (6)$$

$$\Pi_3 = \frac{P.C_2}{l.v^3}$$

onde:

a - remoção de material em mg

v - velocidade em m/min

p - pressão em kPa

Tg - tamanho de grão em  $\mu\text{m}$

l - quantidade do meio de lapidação sobre o disco em mg /  $\text{cm}^2$

$C_2$  - constante adimensional em  $\text{m}^2/\text{s}$

Através da apresentação de  $\Pi_2$  e  $\Pi_3$ ,  $\Pi_1$  e  $\Pi_2$ ,  $\Pi_1$  e  $\Pi_3$  em forma de gráficos com escala logarítmica, obtém-se a relação entre os produtos adimensionais. As equações 8 e 9 mostram as relações entre os produtos adimensionais.

$$\Pi_1 = b_{12} \cdot \Pi_2^{-m_4} \quad (8)$$

$$\Pi_2 = b_{23} \cdot \Pi_3^{m_3} \quad (9)$$

Na determinação de  $\Pi_3$  a constante adimensional  $C_2$ , é adotada como sendo igual a 1. Esta grandeza não é dependente dos parâmetros acima descritos, mas é influenciada pela temperatura do meio de lapidação e a deformação plástica da superfície do corpo de prova.

Os coeficientes  $b_{23}$  e  $b_{12}$  são obtidos através dos gráficos para cada tamanho de grão  $Tg$ , logo:

$$b_{12} = C_3 \cdot Tg^{m_1} \quad (10)$$

$$b_{23} = C_4 \cdot Tg^{m_2} \quad (11)$$

onde  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $m_1$  e  $m_2$  são obtidos através dos gráficos.

Através de uma relação entre as equações 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11, chega-se ao resultado final da equação da remoção:

$$a = C_3 \cdot C_4^{-m_4} \cdot C^{-m_3 \cdot m_4} \cdot Tg^{m_1 - m_2 \cdot m_4} \cdot v^{3 \cdot m_3 \cdot m_4 - 1} \cdot$$

$$p^{1 - m_3 \cdot m_4} \cdot l^{m_3 \cdot m_4} \quad (12)$$

Enger apresenta outros produtos adimensionais, onde é levado em consideração a área da peça e o tempo de lapidação, além da diminuição de um produto adimensional. Experimentalmente foi visto que existe uma proporcionalidade entre a remoção e a velocidade de lapidação como mostra a figura 3.34.

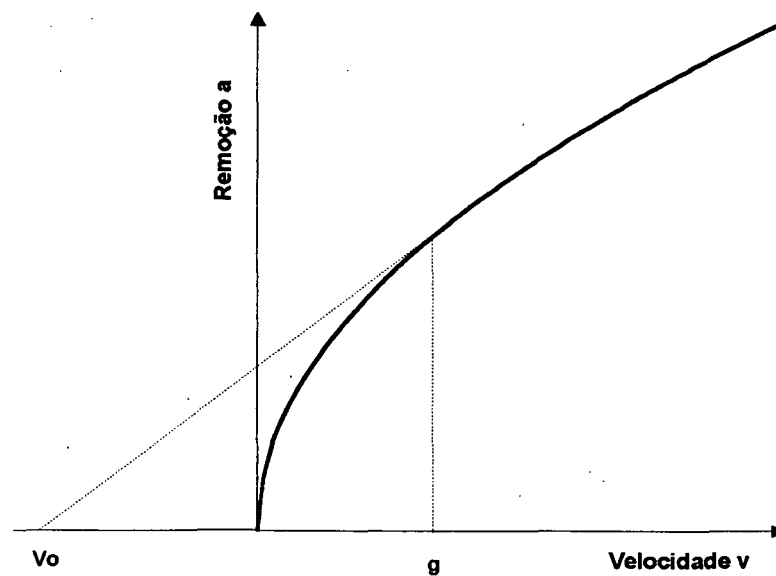


Figura - 3.34: Remoção de material em função da velocidade [21].



Para  $g > v$  temos:

$$a = \text{const}(v_0 + v) \quad (13)$$

onde  $v_0$  e  $g$  são influenciados pelo tipo de material.

Com isto, Enger gerou dois produtos adimensionais:

$$\Pi_1 = s_r \frac{Tg}{l} \quad (14)$$

$$\Pi_2 = C_2 \sqrt{\frac{l}{p \cdot Tg^3}} \quad (15)$$

é definida a remoção específica como sendo:

$$s_r = \frac{a}{(v_0 + v) \cdot t \cdot A_{peca}} \quad (16)$$

Através da apresentação de  $\Pi_1$  e  $\Pi_2$  em forma de gráfico com escala logarítmica, determina-se a relação entre os produtos através da equação:

$$\Pi_1 = C_1 \cdot \Pi_2^{-m_5} \quad (17)$$

Chegando-se a forma final:

$$a = C_1 C_2^{-m_5} \cdot (v_0 + v) \cdot t \cdot A_{peca} \cdot p^{\frac{m_5}{2}} \cdot Tg^{\frac{3 \cdot m_5 - 2}{2}} \cdot l^{\frac{2 - m_5}{2}} \quad (18)$$

Esta equação pode ser estendida para o caso de uma remoção pontual em uma peça. Considerando-se que em uma pequena região da peça, todos os pontos estão sujeitos as mesmas condições. A remoção desta pequena região pode ser considera como um cilindro, como mostra a figura 3.35.

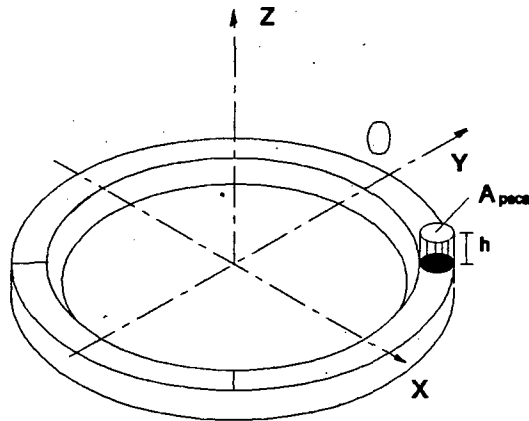


Figura - 3.35: Remoção da área da peça.

Para uma pequena área  $A_{peça}$ , uma remoção  $a$  e a densidade do material, obtém-se a profundidade de remoção através da equação 19:

$$h_r = \frac{a}{A_{peça} \cdot \rho} \quad (19)$$

Substituindo a equação 19 na equação 14 e esta na 13, obtém-se o produto adimensional  $\Pi_1$  em função da profundidade de remoção, equação 20. A forma da equação da remoção final pode ser utilizada para a simulação de remoção da peça e do disco de lapidação, equação 21.

$$\Pi_1 = \frac{h_r \cdot \rho \cdot Tg}{(v_0 + v) \cdot t \cdot l} \quad (20)$$

$$h_r = \frac{1}{\rho} C_1 \cdot C_2^{-m_5} \cdot (v_0 + v) \cdot t \cdot p^{\frac{m_5}{2}} \cdot Tg^{\frac{3 \cdot m_5 - 2}{2}} \cdot l^{\frac{2 - m_5}{2}} \quad (21)$$

## **CAPÍTULO 4**

# **MODELAMENTO DA CINEMÁTICA E DO DESGASTE DO DISCO NA LAPIDAÇÃO PLANA**

### **4.1 - MODELO DA CINEMÁTICA DA LAPIDAÇÃO PLANA**

A descrição do movimento da peça sobre o disco de lapidação é de grande importância para se determinar o desgaste do disco de lapidação e o decorrente erro de forma da peça e permitir a descrição da movimentação do grão abrasivo entre a peça e disco de lapidação.

O modelo da cinemática da lapidação plana pode ser separado em dois submodelos. Um tem como conteúdo os elementos de influência nos resultados de trabalho geométricos e é chamado de macrocinemática, o outro, os elementos influentes nos resultados de trabalho físico, que é denominado de microcinemática.

A macrocinemática tem uma influência muito grande no comportamento de desgaste do disco de lapidação como também uma correlação com o erro de forma da peça lapidada.

A microcinemática tem como conteúdo as formas de movimento relativo entre as partes atuantes ( peça, grão e ferramenta ), descrita pela mudança de orientação destas partes em relação a orientação momentânea.

O modelo de cinemática da lapidação plana que será descrito, tem como pré-requisito que as peças não possuam capacidade própria de rotação dentro do anel de lapidação [23].

#### **4.1.1 - MODELAMENTO DO MOVIMENTO**

Para que o movimento de uma peça possa ser determinado, a área da base da peça deve ser interpretada como um conjunto de elementos infinitesimais de área. Estes percorrem trajetórias curvas em relação ao disco de lapidação, com rotação constante, e podem ser descritos

matematicamente de forma exata.

Apesar de nas lapidadoras existirem até 3 mecanismos independentes para a geração do movimento relativo entre as partes ativas, os movimentos gerados na lapidação plana, na verdade são movimentos com apenas um grau de liberdade, que podem ser modelados em função do tempo de lapidação.

O movimento de um ponto P, distante  $R_g$  do centro da gaiola, que descreve um movimento sobre o disco de lapidação com um sistema cartesiano relativo ( $OX'Y'$ ), pode ser representado por um modelo de um mecanismo de duas barras, figura 4.1.

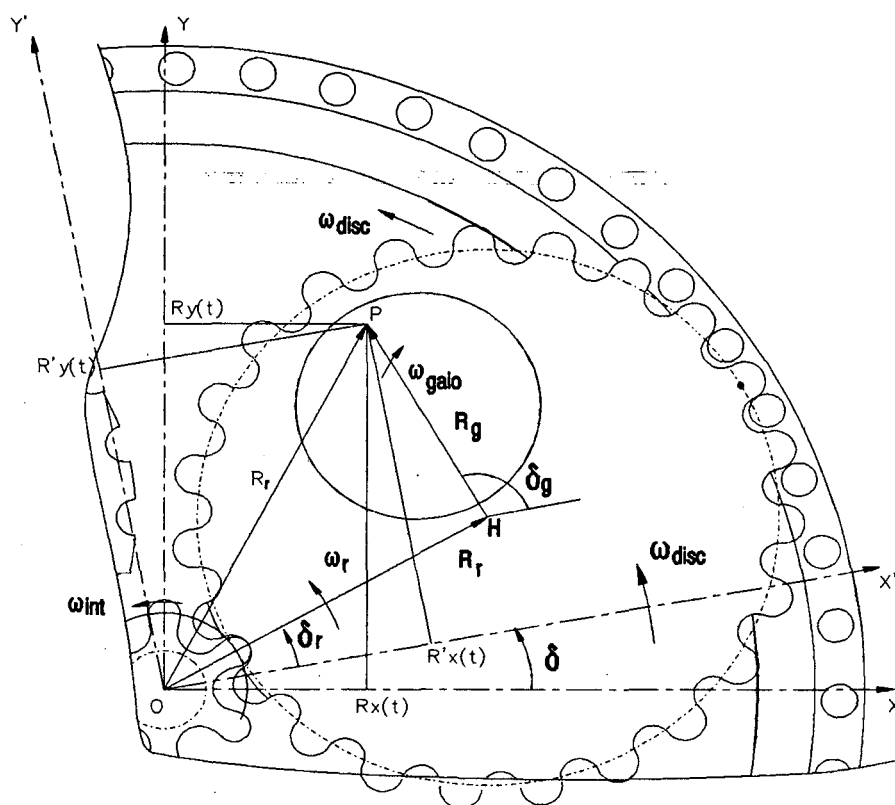


Figura - 4.1 : Modelo da cinemática da lapidação plana.

A barra  $R_r$  representa a rotação da gaiola em torno do centro do disco de lapidação (O). Já a barra  $R_g$  representa a rotação de um ponto da peça em ao centro da gaiola (H). A equação do vetor posição do ponto P em relação ao sistema cartesiano relativo ( $OX'Y'$ ) é escrito como:

$$\begin{aligned}
 R_{OX'Y'}(t) = & (R_r \cdot \text{sen}((\omega_r - \omega_{disc}) \cdot t) + R_g \cdot \text{sen}((\omega_g - \omega_{disc}) \cdot t))j' + \\
 & + (R_r \cdot \cos((\omega_r - \omega_{disc}) \cdot t) + R_g \cdot \cos((\omega_g - \omega_{disc}) \cdot t))i'
 \end{aligned} \quad (22)$$

O vetor da velocidade do ponto P é obtida derivando-se a equação do vetor posição em relação ao tempo:

$$\begin{aligned}
 V_{OX'Y'}(t) = & [-(\omega_r - \omega_{disc}) \cdot R_r \cdot \text{sen}(\omega_r - \omega_{disc}) \cdot t - (\omega_g - \omega_{disc}) \cdot R_g \cdot \text{sen}(\omega_g - \omega_{disc}) \cdot t]i' + \\
 & + [(\omega_r - \omega_{disc}) \cdot R_r \cdot \cos(\omega_r - \omega_{disc}) \cdot t + (\omega_g - \omega_{disc}) \cdot R_g \cdot \cos(\omega_g - \omega_{disc}) \cdot t]j'
 \end{aligned} \quad (23)$$

Derivando-se duas vezes o vetor posição em relação ao tempo, tem-se o vetor aceleração do ponto P:

$$\begin{aligned}
 A_{OX'Y'}(t) = & [-(\omega_r - \omega_{disc})^2 \cdot R_r \cdot \cos(\omega_r - \omega_{disc}) \cdot t - (\omega_g - \omega_{disc})^2 \cdot R_g \cdot \cos(\omega_g - \omega_{disc}) \cdot t]i' + \\
 & + [-(\omega_r - \omega_{disc})^2 \cdot R_r \cdot \text{sen}(\omega_r - \omega_{disc}) \cdot t - (\omega_g - \omega_{disc})^2 \cdot R_g \cdot \text{sen}(\omega_g - \omega_{disc}) \cdot t]j'
 \end{aligned} \quad (24)$$

Para uma lapidadora com acionamento por engrenamento, as velocidades angulares  $\omega_r$  e  $\omega_g$  são escritos em função do número de dentes da engrenagem interna, externa, gaiola e da velocidade angular da engrenagem interna. As equações 25 e 26 mostram a relação entre estes parâmetros [25;27].

$$\omega_r = \frac{N_{inte}}{N_{inte} + N_{ext}} \cdot \omega_{inte} \quad (25)$$

$$\omega_g = \frac{(N_{gai} - N_{ex}) \cdot N_{inte}}{(N_{inte} + N_{ex}) \cdot N_{gai}} \cdot \omega_{inte} \quad (26)$$

Para que possa ser feita uma comparação entre diferentes tipos de trajetórias é necessário definir o fator cinemático  $K_t$  como sendo uma função das velocidades angulares das barras  $R_r$  e  $R_g$ , equação 27 [27].

$$K_t = \left| \frac{\omega'_g}{\omega'_r} \right| = \left| \frac{\omega_g - \omega_{disc}}{\omega_r - \omega_{disc}} \right| \quad (27)$$

#### 4.1.2 - PERÍODO

Na lapidação, movimentos se repetem em períodos fixos. Assim, é representado como período  $T_z$ , o intervalo de tempo necessário, sob o ponto de vista cinemático, para que sejam descritas repetições de movimentos relativos entre as partes ativas, dentro do tempo total de lapidação  $T_l$  [28]. Matematicamente ele pode ser escrito como o período de tempo onde o vetor posição  $R_r(t)$  no tempo  $T_z$  tem o seu comprimento original [27], ou seja,

$$|R_r(t=T_z)| = |R_r(t=0)| \quad (28)$$

Através da combinação entre os vetores  $R_r(0)$  e  $R_r(T_z)$  temos para  $T_z$ :

$$T_z = \frac{2 \cdot \pi}{|\omega_r - \omega_g|} \quad (29)$$

A figura 4.2, mostra o período  $T_z$  para uma trajetória hipocicloidal.

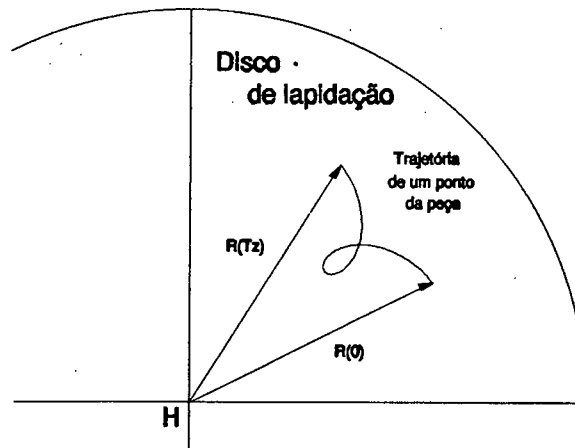


Figura - 4.2: Período  $T_z$  para uma trajetória hipocicloidal.

O período de repetição  $T_w$  é o tempo necessário para que os pontos da peça comecem a percorrer os mesmos pontos da curva sobre o disco de lapidação. A determinação de  $T_w$  se dá através do cálculo em que os períodos  $T_{11}$  e  $T_{2j}$  são iguais, e os valores das funções  $f_1$  e  $f_2$  forem iguais a 1, figura 4.3 [27].

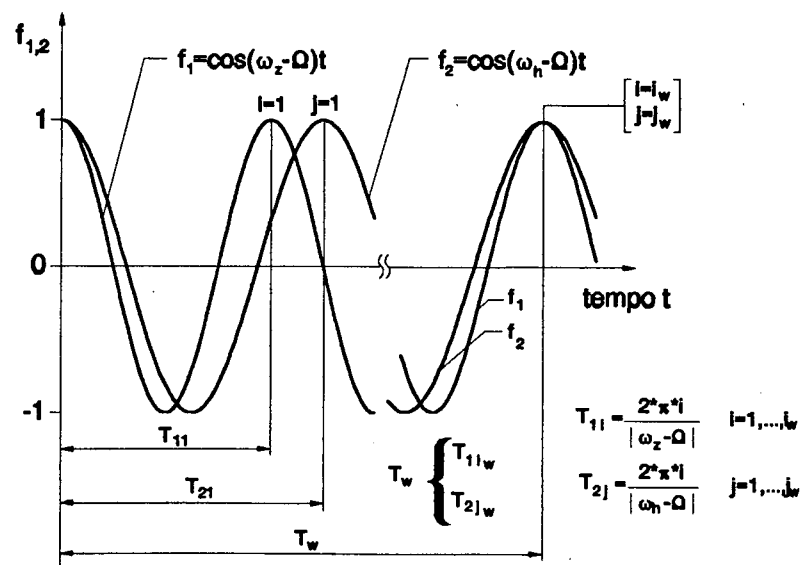


Figura - 4.3: Gráfico da determinação de  $T_w$  [27].

Através duma escolha correta dos parâmetros cinemáticos o período  $T_w$  deve ser aumentado o máximo possível, já que associada a este aumento está uma distribuição regular das trajetórias de pontos da peça sobre o disco. A figura 4.4a mostra um exemplo de atraso desfavorável, onde para o fator cinemático  $K_t = 1,75$  ocorre a repetição da trajetória de um ponto da peça depois de três rotações da gaiola em torno do centro do disco de lapidação. Modificando os fatores cinemáticos para obtenção de  $K_t = 1,71$ , aumentando o período de repetição, obtém-se uma distribuição da trajetória de um ponto da peça mais distribuída sobre o disco de lapidação, figura 4.4b [27].

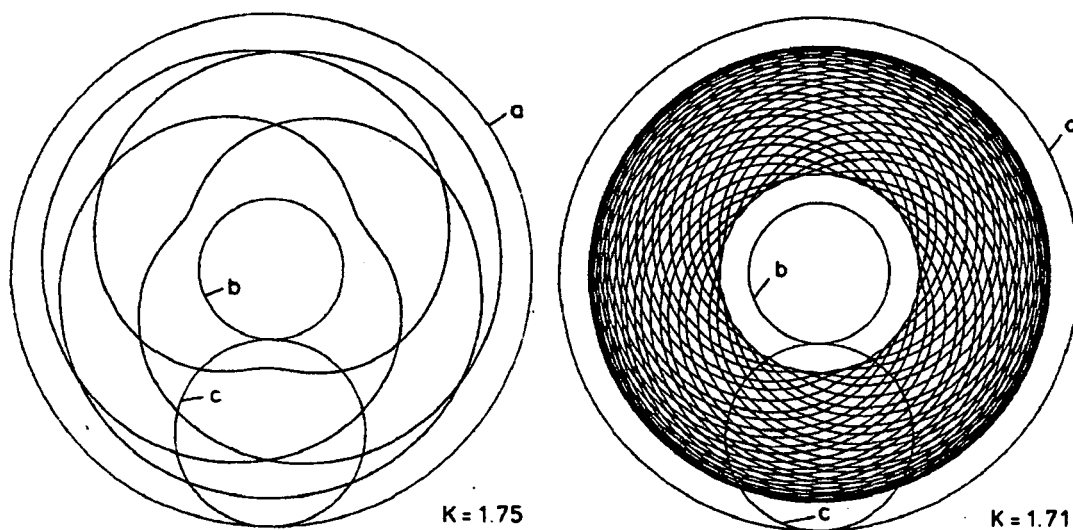


Figura - 4.4: Tempo de repetição  $T_w$  para duas diferentes trajetórias [27].

a - disco de lapidação; b - engrenagem interna; c - gaiola.

#### 4.1.3 - FORMAS DE MOVIMENTAÇÃO MACROKINEMÁTICAS

As formas de movimentos macrocinemáticos possíveis são classificadas em trajetórias curvas epi ou hipocicloides alongadas, normais e "enlaçadas" (figuras 4.4a e 4.4b) como também em casos especiais, formas circulares [28].



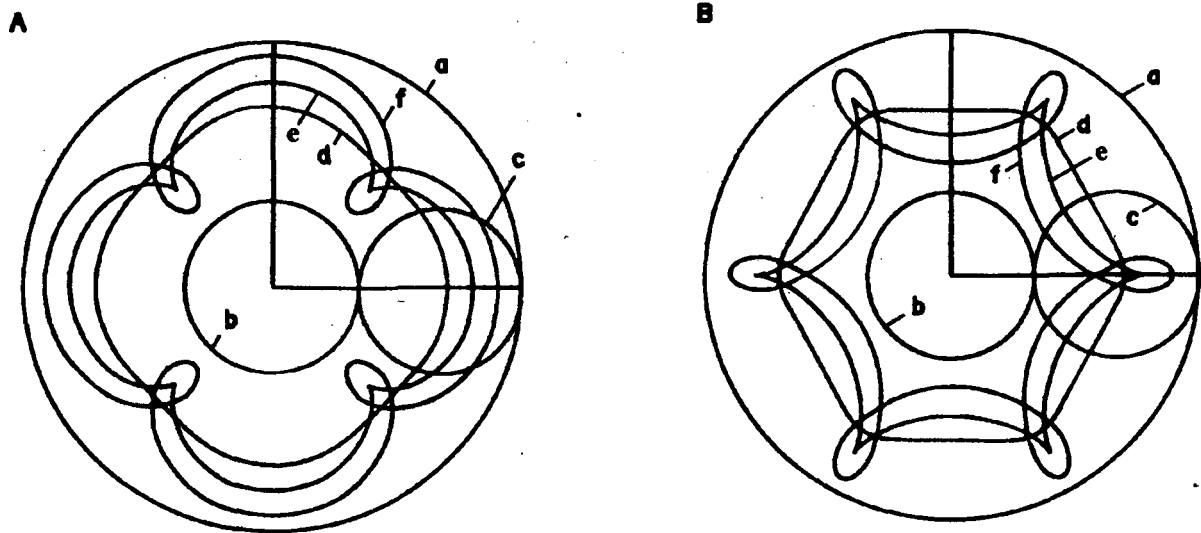


Figura - 4.5: Trajetórias curvas epi e hipocicloidais [28].

A - Curva Epicicloide B - Curva Hipocicloide  
a - engrenagem externa, b - engrenagem interna, c - gaiola,  
d - ciclóide alongada, e - ciclóide normal, f - ciclóide enlaçada

Segundo Spur [27], uma trajetória é classificada como epicicloidal se:

$$\text{sin} \omega'_g = \text{sin} \omega'_r \quad (30)$$

Ou uma hipocicloidal se:

$$\text{sin} \omega'_g \neq \text{sin} \omega'_r \quad (31)$$

onde,

$$\omega'_g = \omega_g - \omega_{disc} \quad (32)$$

$$\omega'_r = \omega_r - \omega_{disc} \quad (33)$$

#### 4.1.4 - FORMAS DE MOVIMENTAÇÃO MICROKINEMÁTICA

No campo da microcinemática deve-se separar as formas de movimento em rotatórias e oscilatórias, cujas curvas características, dependentes do tempo, influenciam nos fenômenos das zonas de contato entre as partes ativas ( peça/grão, ferramenta/grão ). Assim estes também influenciam tanto a estrutura da superfície gerada como também os mecanismos de remoção de cavaco.

Além disso, ocorrem influências sobre a maneira da solicitação dos grãos e com isso, sobre o comportamento de quebra e desgaste destes.

Enquanto os movimentos macrocinemáticos entre os segmentos infinitesimais da peça e do disco de lapidação, mesmo sendo cicloidais, são interpretados como puramente translacionais, a microcinemática descreve as mudanças sobrepostas a movimento de translação. Este comportamento é mostrado na fig 4.6.

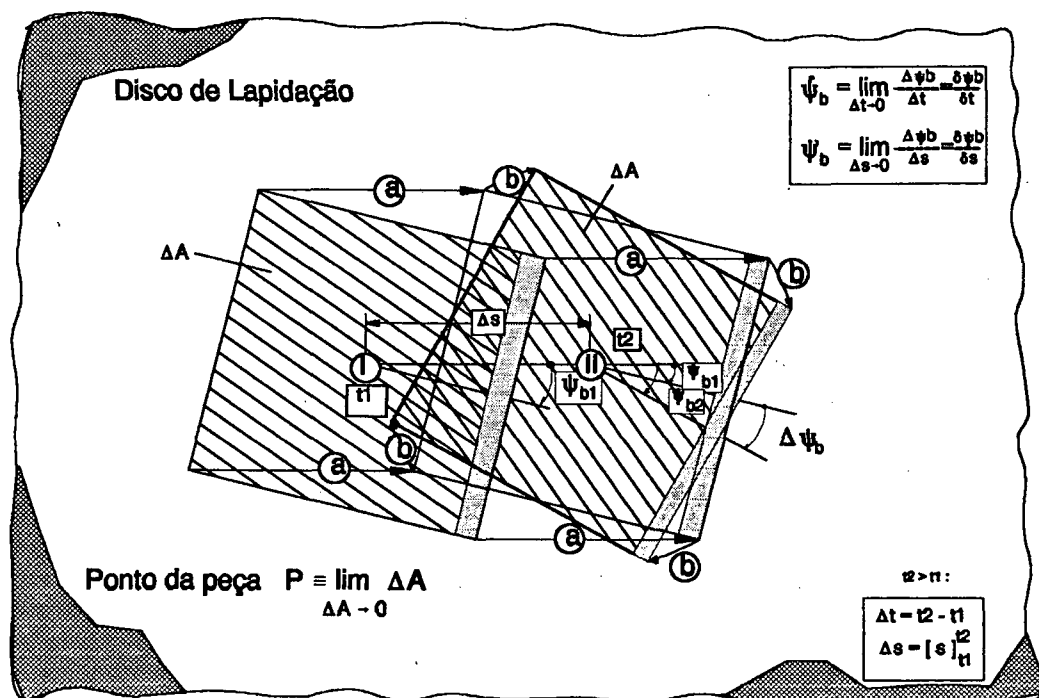


Figura - 4.6: Princípio de superposição de formas de movimentos micro e macrocinemáticos [28].

Modela-se um ponto P da peça, como sendo um quadrado cujo comprimento da aresta tende a zero. Após um certo tempo  $t_1$ , o centro do quadrado atinge a posição I sobre o disco de lapidação parado ou girando com uma velocidade angular  $\omega_{disc}$  qualquer, a orientação da área quadrática com relação à tangente momentânea à trajetória é chamado de ângulo de rotação da trajetória  $\psi_{b1}$ .

Assim, um movimento parcial macrocinemático translacional "a", superposto com um outro movimento parcial microcinemático rotacional "b", conduz a área quadrática para posições e orientações variadas no disco de lapidação.

Com relação à mudança do ângulo de rotação da trajetória  $\Delta\psi_b$  podemos analisa-la de duas maneiras: uma em função do tempo  $\Delta t$  necessário para o deslocamento da posição I para II, onde aplicando-se o limite, tem-se  $\psi_b = \lim_{(\Delta t \rightarrow 0)} \Delta\psi_b / \Delta t = d\psi_b / dt$ , e a outra, em função do segmento de trajetória:  $\psi_b = \lim_{(\Delta s \rightarrow 0)} \Delta\psi_b / \Delta s = d\psi_b / ds$ .

Com o mesmo princípio de definição do ângulo de rotação da trajetória, define-se por ângulo de "arranque", o ângulo descrito por um elemento infinitesimal de área da peça devido a perturbações momentâneas dadas através do meio de lapidação.

O conhecimento da grandeza como também da dependência com o tempo deste ângulo é de sobremodo importante pois um fluxo de fluido demasiadamente intenso, proveniente de uma tubeira, pode levar à formação de figuras texturadas na superfície lapidada [28].

## 4.2 - MODELO DE DESGASTE DO DISCO DE LAPIDAÇÃO E DAS PEÇAS LAPIDADAS

A forma de desgaste do disco de lapidação influe diretamente sobre os erros de planicidade e paralelismo da peça e é determinada através do cálculo da densidade de distribuição de trajetória. A densidade de distribuição de trajetória da peça tem, também, influência marcante sobre os erros de planicidade e paralelismo das peças. Estes estão correlacionado com os fatores cinemáticos, com a disposição das peças na gaiola e com a geometria das peças.

#### 4.2.1 - MODELO DO DESGASTE CINEMÁTICO DA PEÇA LAPIDADA

Supondo que uma peça dentro da gaiola não tenha capacidade própria de rotação, o conjunto dos pontos de uma peça equidistantes do centro da gaiola H, percorrem a mesma forma de trajetória, apresentando apenas uma diferença de fase. Por isso estes pontos podem ser igualmente qualificados e tratados matematicamente.

A posição geométrica desses pontos é um círculo concêntrico com o centro da gaiola H, com raio  $R_g$ , e é independente da geometria da peça, figura 4.7.

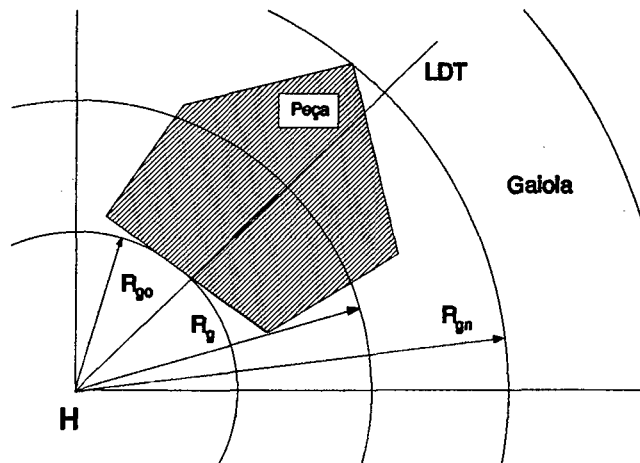


Figura - 4.7: Posicionamento de uma peça prismática.

Diante deste fato, pontos da peça com diferentes distâncias  $R_g$  do centro da gaiola H, percorrem comprimentos de caminhos diferentes e consequentemente diferentes remoções podendo ocasionar assim erros de planicidade e paralelismo na peça lapidada.

O cálculo do comprimento de trajetória percorrido por cada conjunto de pontos da peça, distantes  $R_g$  do centro do disco de lapidação, é feito através da integração do vetor velocidade desde o tempo  $t = 0$  até  $t = t_1$ :

$$S(R_g) = \int_{t=0}^{t=t_1} v(R_g, t) \cdot dt \quad (34)$$

Com o cálculo do comprimento de trajetória de cada ponto, desde o ponto contido no círculo concêntrico mais próximo do centro do disco H de raio  $R_{g0}$  até o ponto contido no círculo concêntrico mais distante de raio  $R_{gn}$  é obtido o gráfico da densidade de trajetória  $dt(R_g)$  da peça,

sendo este representado pela linha de densidade de trajetória (LDT).

Normaliza-se a densidade de distribuição de trajetória dividindo-se a mesma pelo comprimento de trajetória máximo:

$$d'_i(e_h) = \frac{d_i(e_h)}{S_{\max}} \quad (35)$$

#### 4.2.2 - MODELO DE DESGASTE DO DISCO

Para a simulação do desgaste do disco de lapidação plana é utilizado o método da setorização de arcos, que parte das seguintes considerações:

- Independência do desgaste radial do disco de lapidação em função da posição angular;
- Disco sem ranhuras;
- Homogeneidade do material da peça e do disco;
- Constância da pressão de lapidação na zona de ação;
- Influência do meio de lapidação independente do tempo e posição [23].

Para se conhecer o desgaste das regiões sobre o disco de lapidação, é necessário dividir o disco de lapidação de largura efetiva  $b_{re}$  em classes  $K$ , em formas de anéis de largura infinitesimal  $w_k$ , tendendo a zero e concêntricos com o eixo central, figura 4.8.

Escolhendo-se pontos  $P$  equidistantes do centro da gaiola portanto em um círculo infinitesimalmente próximos entre si. O movimento desses pontos, analisados no domínio do tempo, em um espaço de tempo de meio período ( $T_z/2$ ) é suficiente para representar o movimento global no tempo total de lapidação  $T_l$ . Através da geração de um grupo de trajetórias curvas cujo vetor posição  $R_{rj}(t)$  tem seu módulo e direção determináveis a qualquer momento, pode-se calcular o comprimento dos segmentos de trajetória  $S_{ij}$  das curvas dos  $j$ -ésimos pontos da peça  $P_j$  nos  $i$ -ésimas classes do disco de lapidação no intervalo de tempo  $t_{ij}$  entre a entrada da trajetória curva na  $i$ -ésima classe ( $t=te_{ij}$ ) e a sua saída da mesma classe ( $t=ts_{ij}$ ) [23].



$$\frac{S_i}{A_i} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n \frac{\Delta S_{ij}}{A_i} \quad (37)$$

Para o cálculo da densidade de distribuição de trajetória do disco de lapidação é necessário a descrição da configuração da peça. Utiliza-se neste caso, ao invés dos pontos concêntricos com o centro na gaiola H e raio  $e_{hj}$ , o comprimento dos segmentos de arco  $g_{wj}$  por eles formados dentro da peça, como mostra a figura 4.9.

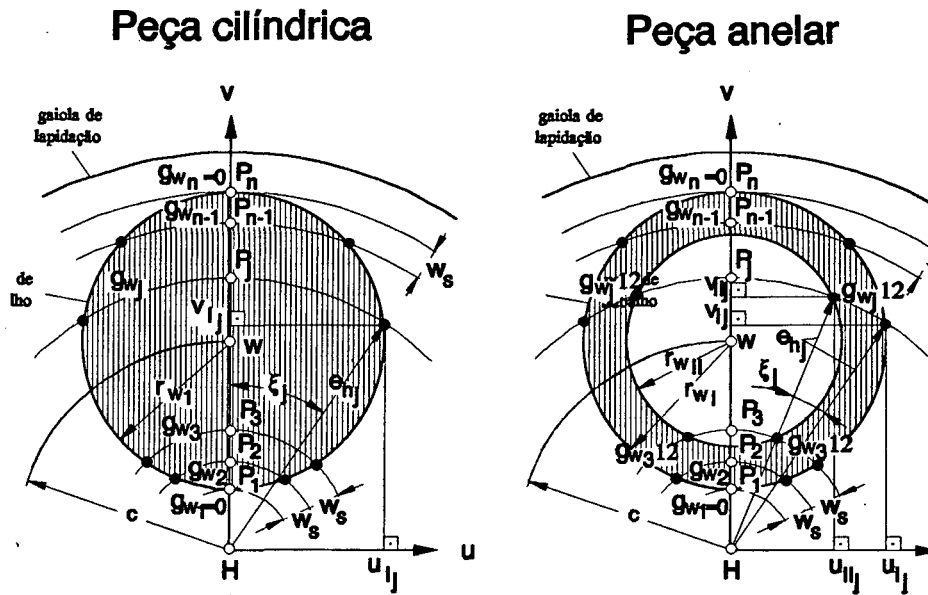


Figura - 4.9: Descrição dos comprimentos de arcos da peça [23].

Normalizando o comprimento dos segmentos de arco:

$$g'_{wj=1, \dots, n} = \frac{g_{wj=1, \dots, n}}{\max(g_{wj})} \quad (38)$$

Fazendo  $j$  tender a infinito, tem-se a densidade de posição da gaiola  $d'_d$  (eh) através da seguinte equação:

$$d'_d(R_g) = \lim_{n \rightarrow \infty} g'_{wj=1, \dots, n} \quad (39)$$

Multiplicando os comprimentos dos segmentos de trajetória  $\Delta S_{ij}$  pelos segmentos de arco  $g'_{wi}$ , tem-se, para cada posição da gaiola, uma grandeza para a distribuição de todos os comprimentos de trajetória sobre o disco de lapidação, os quais são denominados densidade de distribuição dos comprimentos de trajetórias.

$$d_s(r_1) = \lim_{m \rightarrow \infty} \left[ \frac{S_i}{A_i} \right]_{i=1, \dots, m} \quad (40)$$

$$= \lim_{m \rightarrow \infty} \left[ \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n \frac{\Delta S_{ij} g_{wj}}{A_i} \right]_{i=1, \dots, m} \quad (41)$$

Normalizando ds com relação à densidade de distribuição da classe do meio do disco de lapidação ( $r_1=a_2$ ), a qual tem a particularidade de ser coberta pelas trajetórias de todos os pontos da peça, obtem-se a densidade de distribuição de comprimento de trajetória em função de cada raio do disco de lapidação  $r_1$  [23].

$$d'_s(r_1) = \frac{d_s(r_1)}{d_s(a_2)} \quad (42)$$



## **CAPÍTULO 5**

### **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESGASTE DO DISCO DE LAPIDAÇÃO E DA PEÇA**

A particularidade tecnológica da lapidação, sem contar o meio empregado, é a estreita relação dos fatores tecnológicos, cinemáticos, dinâmicos e geométricos. Mudando-se os fatores cinemáticos, velocidade e aceleração da peça, com o objetivo de, por exemplo, aumentar a produtividade, automaticamente mudam a precisão e a qualidade superficial da mesma [20]. O desgaste heterogêneo do disco de lapidação resulta da escolha desfavorável entre os elementos atuantes. Portanto a escolha correta dos componentes cinemáticos e do posicionamento das peças na gaiola tem como objetivo a otimização do processo, através de um desgaste uniforme do disco de lapidação e de peças com baixos erros de forma. Neste capítulo é realizada a simulação do desgaste do disco de lapidação e da peça lapidada em função de vários fatores.

#### **5.1 - DESCRIÇÃO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO**

O software desenvolvido utiliza um modelo para uma lapidadora plana com acionamento por engrenamento externo. Este software calcula a trajetória de um ponto da peça, o comprimento de trajetória percorrido e a velocidade, como também o desgaste do disco de lapidação e a densidade de trajetória da peça. Ele é dividido em 4 módulos principais: definições, cálculo da trajetória, cálculo da velocidade e cálculo do desgaste. O módulo desgaste por sua vez é dividido em arquivo, posicionamento e cálculo do desgaste do disco e das peças. A figura 5.1 mostra o diagrama geral do simulador da lapidação plana, e em seguida é feita a descrição de cada módulo.

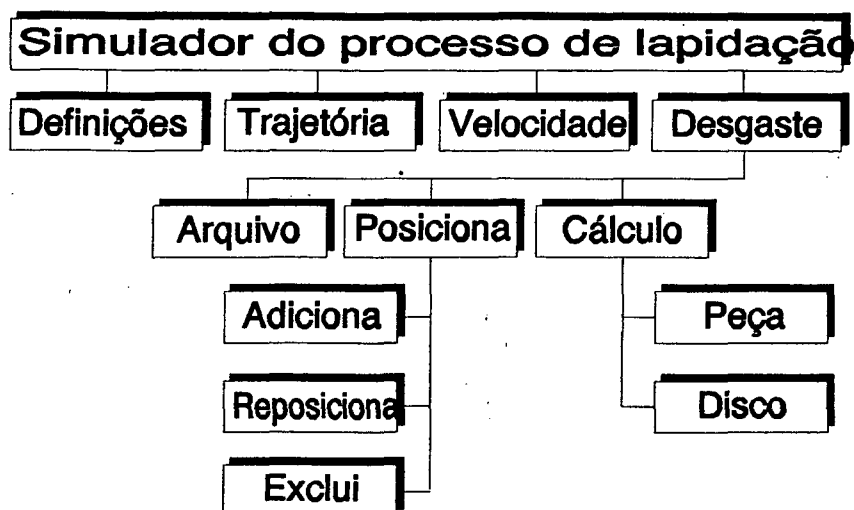


Figura - 5.1: Diagrama geral do simulador de lapidação

### 5.1.1 - MÓDULO DE DEFINIÇÕES

Neste módulo são definidas os parâmetros característicos da lapidadora necessários para a simulação do processo, e a posição de um ponto da peça para o cálculo de sua trajetória e velocidade, figura 5.2.

A imagem mostra a interface gráfica do simulador. À esquerda, há uma barra lateral com botões para "Definições", "Trajetória", "Velocidade", "Desgaste" e "Saída". O botão "Definições" está selecionado. À direita, uma janela intitulada "Definição dos dados da lapidação" contém uma lista de parâmetros com seus respectivos valores numéricos e botões "Ler", "Gravar" e "Sair" na base.

| Definição dos dados da lapidação            |       |
|---|-------|
| Raio do disco de lapidação [mm]             | 192,6 |
| Raio da gaiola [mm]                         | 81    |
| Velocidade do disco de lapidação [rpm]      | 28    |
| Velocidade da engrenagem interna [rpm]      | 29    |
| Distância centro disco - centro gaiola [mm] | 115   |
| Distância centro gaiola - ponto peça [mm]   | 11,8  |
| Nº de dentes engrenagem interna             | 6     |
| Nº de dentes engrenagem da gaiola           | 23    |
| Nº de dentes engrenagem externa             | 52    |

Figura - 5.2: Dados de entrada.

### 5.1.2 - MÓDULO DO CÁLCULO DA TRAJETÓRIA

Neste módulo o sistema mostra uma sequência animada da trajetória de um ponto da peça, em função do tempo de simulação desejado, figura 5.3. São apresentados também, a distância percorrida e os parâmetros cinemáticos calculados ( $T_z$ ,  $T_w$  e  $K_t$ ).

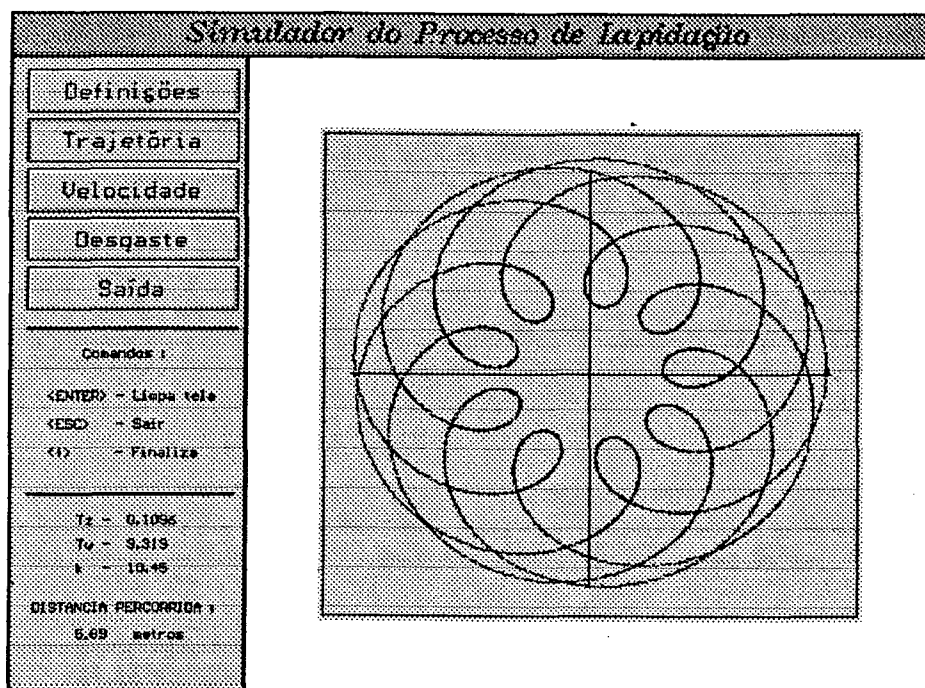


Figura - 5.3: Trajetória de um ponto da peça em relação ao disco de lapidação.

### 5.1.3 - MÓDULO DO CÁLCULO DA VELOCIDADE

A figura 5.4, mostra a velocidade de um ponto em função do tempo, para até o período  $T_z$ , onde a partir deste tempo o gráfico começa a se repetir novamente.

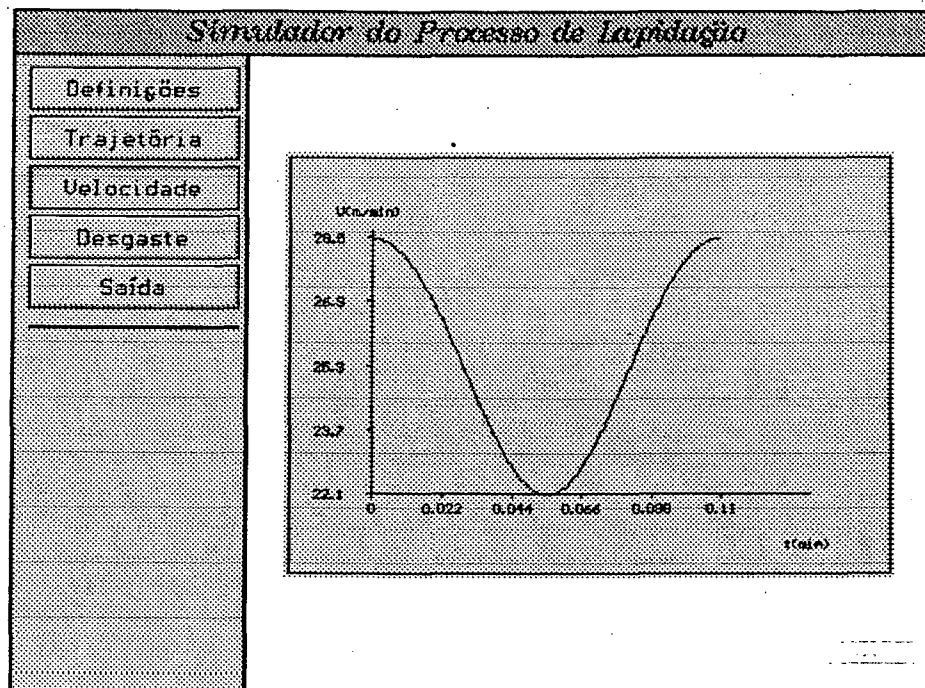


Figura - 5.4: Velocidade de um ponto da peça em função do tempo.

#### 5.1.4 - MÓDULO DO CÁLCULO DO DESGASTE

Neste módulo pode ser calculado tanto o desgaste do disco de lapidação quanto a densidade de trajetória e remoção da peça. Para isto se deve definir a geometria das peças e também o seu posicionamento dentro da gaiola. Este módulo é subdividido em diversas etapas:

##### - DESCRIÇÃO GEOMÉTRICA DAS PEÇAS

A geometria da peça deve ser definida no AUTOCAD, no formato DXF, para que o sistema possa ler o arquivo. As peças devem ser definidas com os comandos CIRCLE, ARC e LINE do AUTOCAD. Outros comandos não são reconhecidos pelo sistema. As peças podem possuir cavidades, como por exemplo uma peça anelar. Uma vez definidas as características geométricas das peças, estas podem ser lidas pelo sistema através da opção ARQUIVO, dentro do módulo DESGASTE [29].

## - POSICIONAMENTO DAS PEÇAS

Podem ser posicionadas diferentes peças na gaiola. O posicionamento é feito de modo interativo através da opção POSICIONA, dentro do módulo DESGASTE. A figura 5.4 mostra um exemplo de posicionamento de várias peças dentro da gaiola.

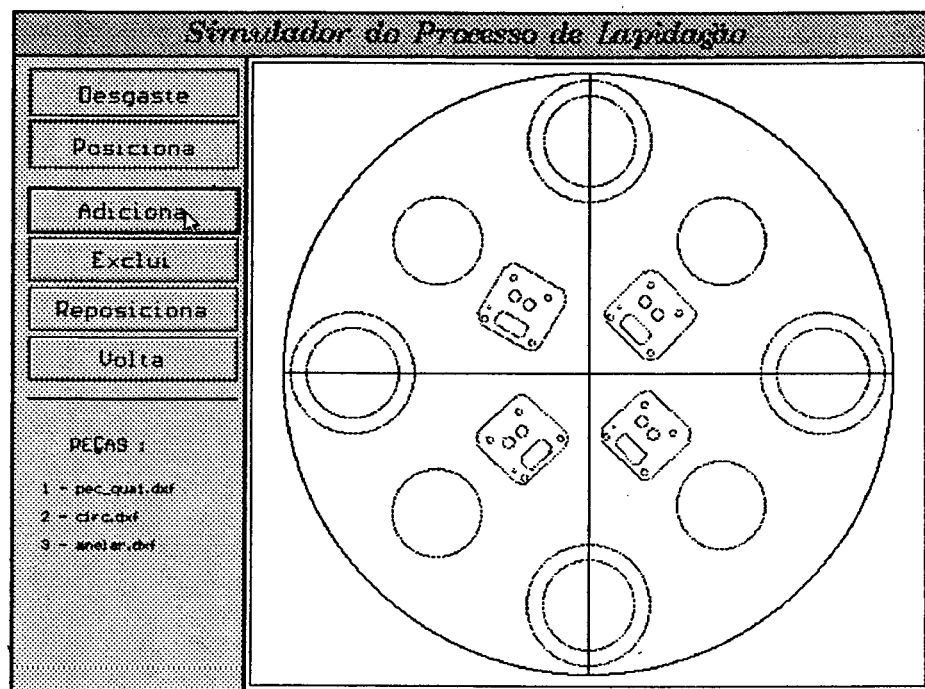


Figura - 5.5: Posicionamento das peças na gaiola.

## - CÁLCULO DA DENSIDADE DE DESGASTE DO DISCO DE LAPIDAÇÃO

Para o cálculo do desgaste do disco leva-se em consideração o posicionamento e a geometria das peças. Variando-se o raio da gaiola, calcula-se o comprimento de arco onde ocorrem interseções com as peças. O comprimento de trajetória percorrido por um conjunto de pontos da peça em um determinado setor do disco multiplicado pelo seu comprimento de arco definem a densidade de desgaste do disco de lapidação[29].

A figura 5.6 mostra um exemplo da densidade de desgaste do disco de lapidação em função do seu raio.

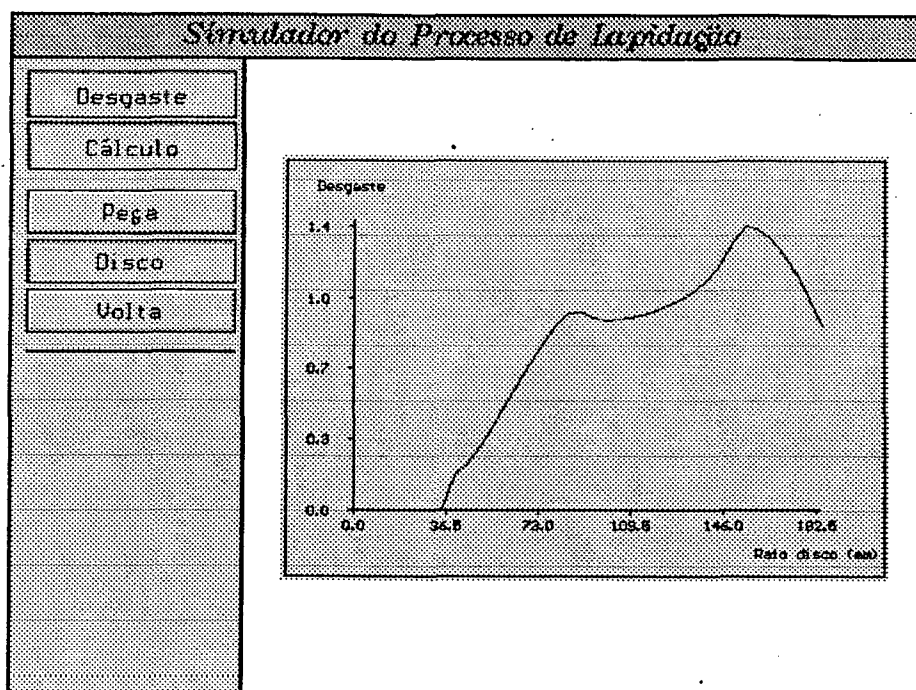


Figura - 5.6: Gráfico da densidade de desgaste do disco de lapidação.

### - CÁLCULO DO DESGASTE DA PEÇA LAPIDADA.

A simulação do desgaste da peça é feita através do cálculo da densidade de trajetória ou pelo cálculo da remoção. Selecionando-se uma peça dentro da gaiola, o cálculo da densidade de trajetória é feito através da integração numérica da velocidade desde o ponto mais próximo do centro do disco  $R_{go}$ , até o mais afastado  $R_{gn}$ . A figura 5.7 mostra um gráfico da densidade de trajetória de uma peça, que coincide com a linha LDT da figura 4.7.

Já o cálculo da remoção é realizada utilizando-se a equação 21. Através do levantamento dos coeficientes desta equação para um determinado material, pode-se simular a remoção em função da pressão, tempo, tamanho de grão e quantidade do meio de lapidação sobre o disco. Isto é feito, para valores determinados, através do cálculo da velocidade média desde o ponto mais próximo do centro da gaiola  $R_{go}$  até o mais afastado  $R_{gn}$ . Para os dois casos de simulação, os erros de planicidade e paralelismo podem ser estimados.

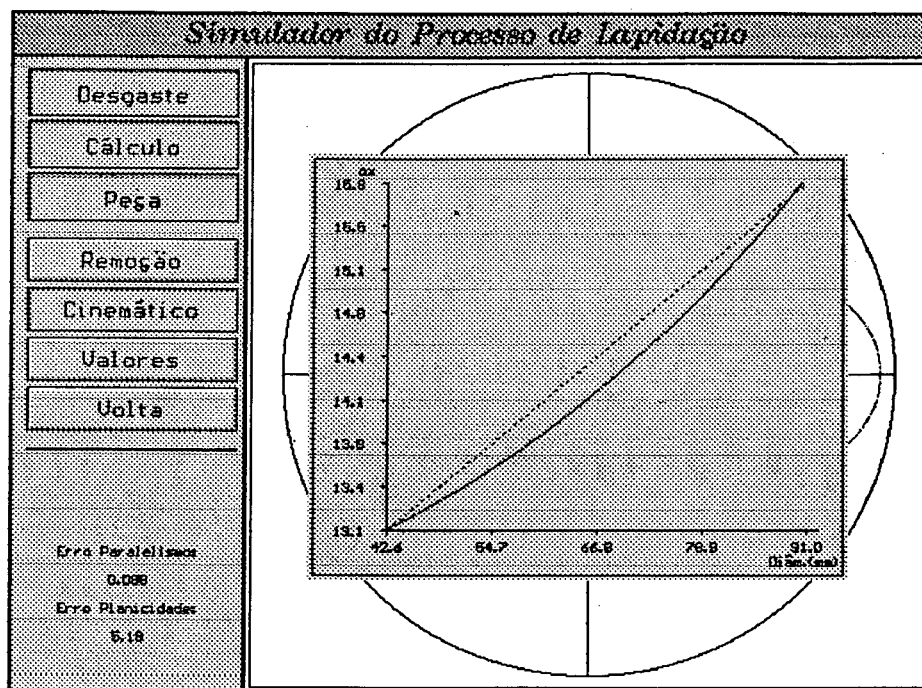


Figura - 5.7: Gráfico da densidade de trajetória de uma peça lapidada.

## 5.2 - SIMULAÇÃO DO DESGASTE DO DISCO DE LAPIDAÇÃO

O posicionamento correto das peças na gaiola, sua geometria (forma e tamanho) são fatores que conjuntamente com a cinemática do processo (velocidades da engrenagem interna, externa e do disco de lapidação) determinam a densidade de desgaste do disco de lapidação. A seguir é mostrado, através da simulação, como cada fator influe no desgaste do disco e como através da variação destes pode-se obter um desgaste homogêneo.

### 5.2.1 - POSICIONAMENTO DA PEÇA NA GAIOLA

O posicionamento da peça na gaiola, para uma determinada condição, é um fator primordial com relação ao desgaste do disco de lapidação e da peça. Para o posicionamento mais afastado do centro da gaiola, figura 5.8, se obtém um desgaste do disco de lapidação mais homogêneo, conforme a figura 5.9.

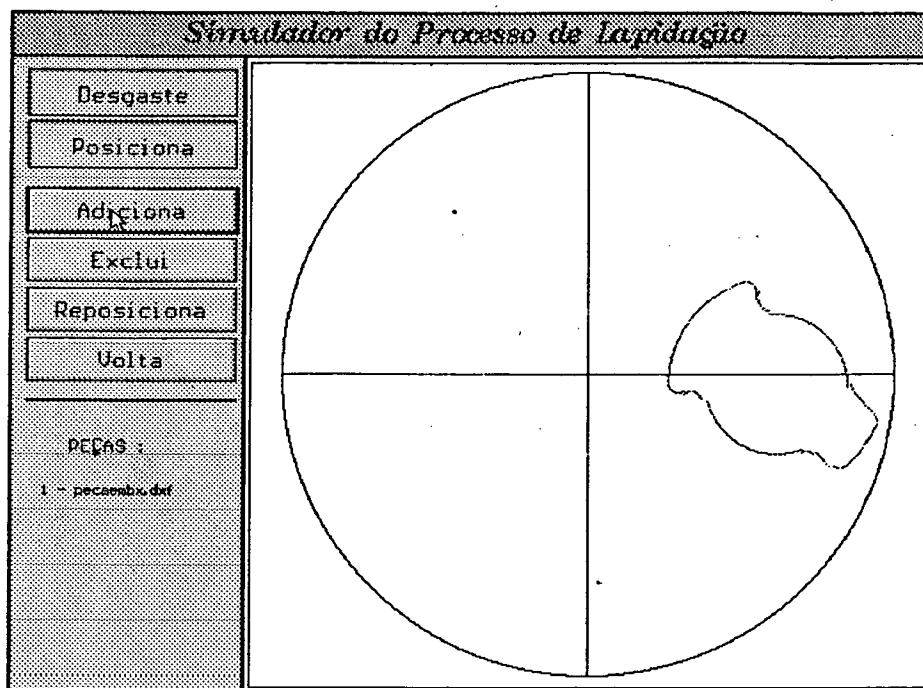


Figura - 5.8: Posicionamento da peça na periferia da gaiola.

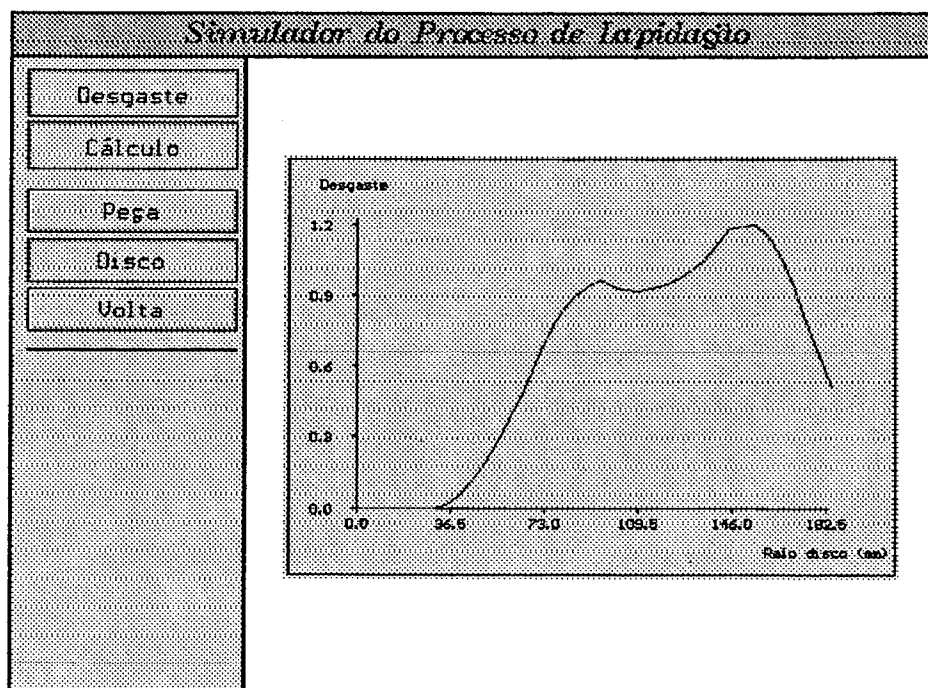


Figura - 5.9: Gráfico do desgaste do disco de lapidação.



Posicionando-se, agora, a peça no centro da gaiola, figura 5.10, o desgaste do disco de lapidação muda em relação à figura 5.9. Este passa a ser mais acentuado em uma estreita região do disco de lapidação, que coincide com o centro da gaiola, figura 5.11.

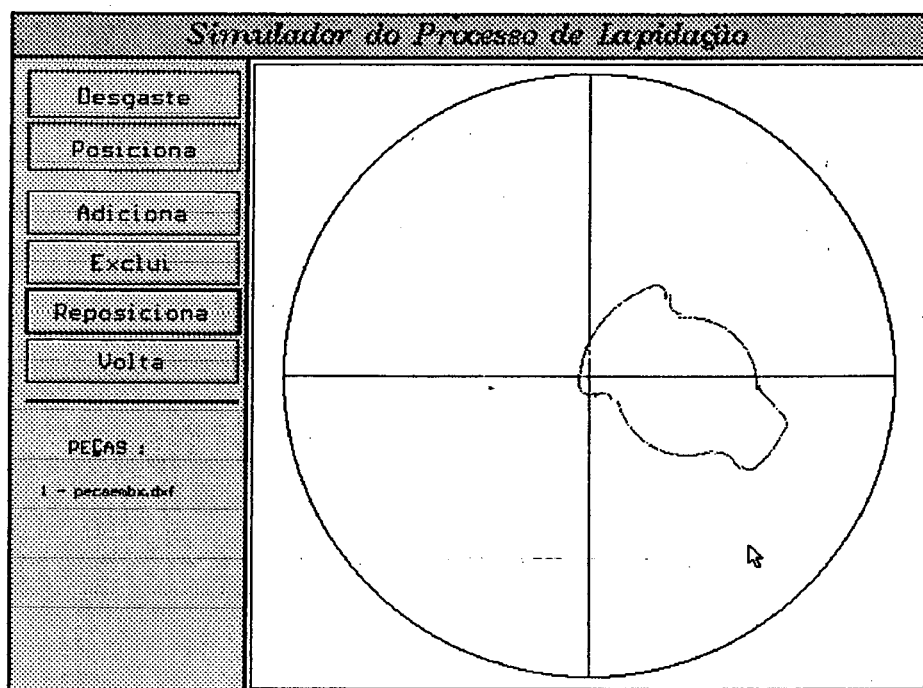


Figura - 5.10: Posicionamento da peça próximo ao centro do disco.

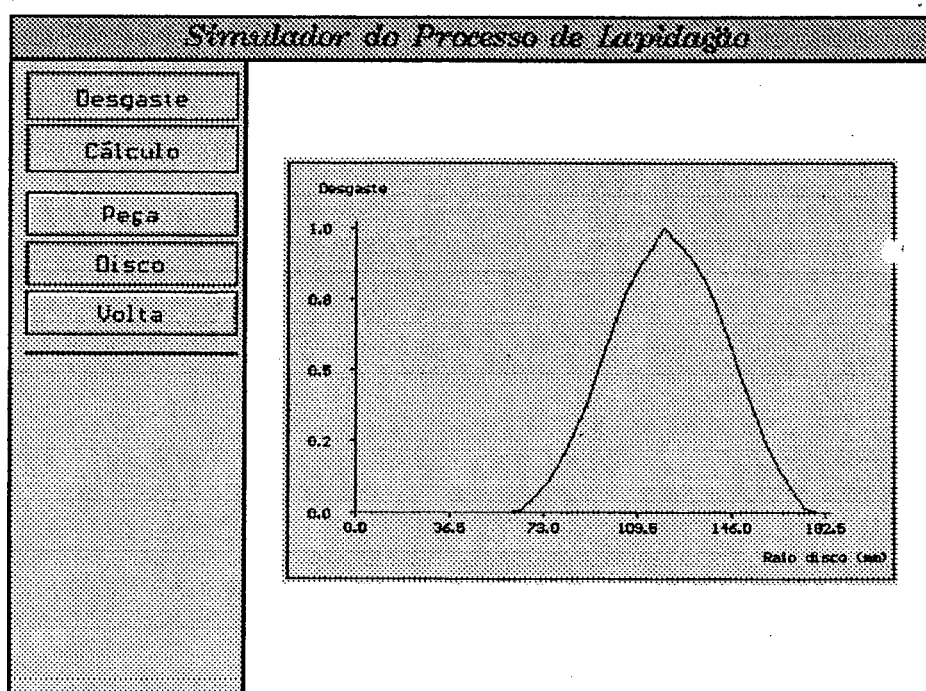


Figura - 5.11: Gráfico do desgaste do disco de lapidação.

Comparando-se os gráficos da figura 5.9 com a figura 5.11, nota-se que para o posicionamento da peça mais na periferia da gaiola se obtém o desgaste mais distribuído no disco. Enquanto que para o posicionamento mais próximo ao centro da gaiola, o desgaste ocorre em uma região preferencial, que coincide com o centro da gaiola. Estas tendências já eram de se esperar, uma vez que para um ponto da peça localizada mais próximo ao centro da gaiola, a trajetória percorrida, em relação ao disco de lapidação, distribui-se mais concentrada em uma faixa que coincide com o centro da gaiola, figura 5.12.

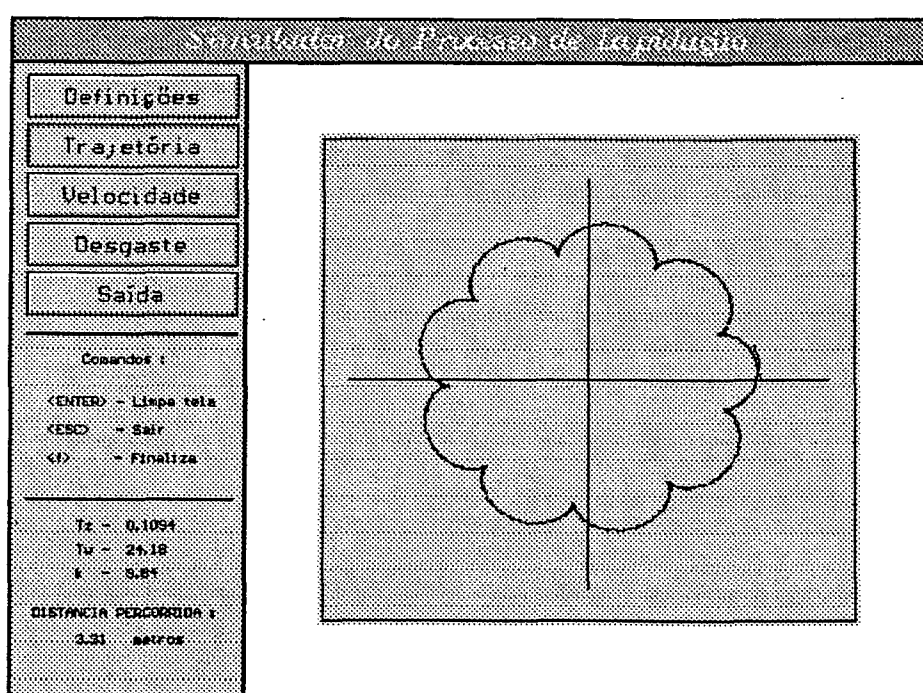


Figura - 5.12: Trajetória de um ponto da peça.

Entretanto, para um ponto mais afastado do centro da gaiola, a distribuição da trajetória deste percorre mais setores do disco de lapidação, conforme mostra a figura 5.13.

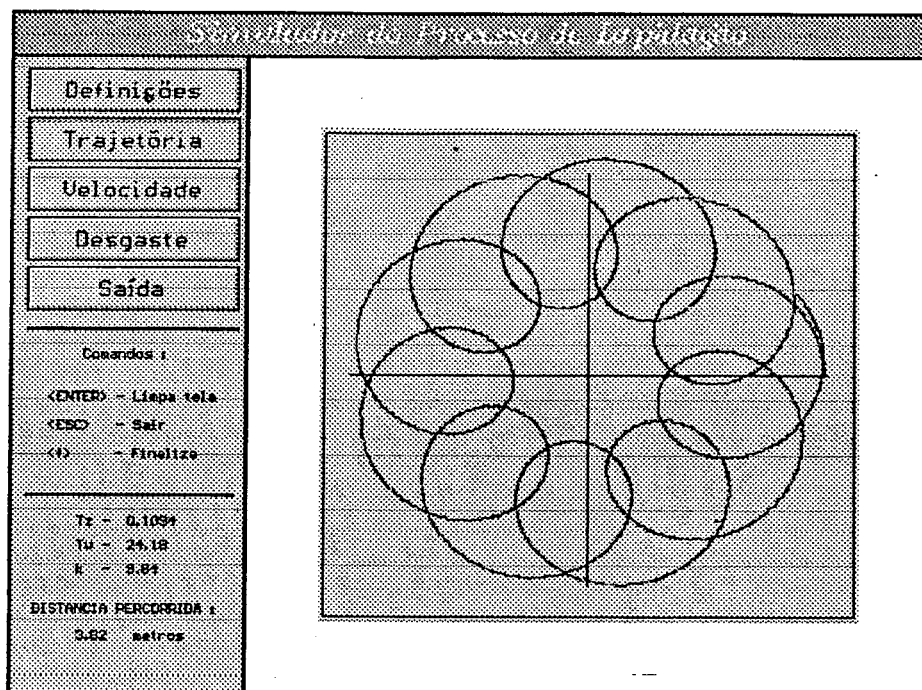


Figura - 5.13: Trajetória de um ponto da peça mais afastada do centro da gaiola.

### 5.2.2 - GEOMETRIA DA PEÇA.

O aumento do tamanho da peça em relação ao tamanho da gaiola leva a uma maior distribuição das trajetórias sobre o disco de lapidação e consequentemente maior uniformidade de desgaste. A figura 5.14 mostra o posicionamento de uma peça. Aumentando seu tamanho, conforme mostra a figura 5.15, para as mesmas condições, o desgaste passa a ser mais homogêneo. Isto pode ser visto comparando-se as figuras 5.16 e 5.17.

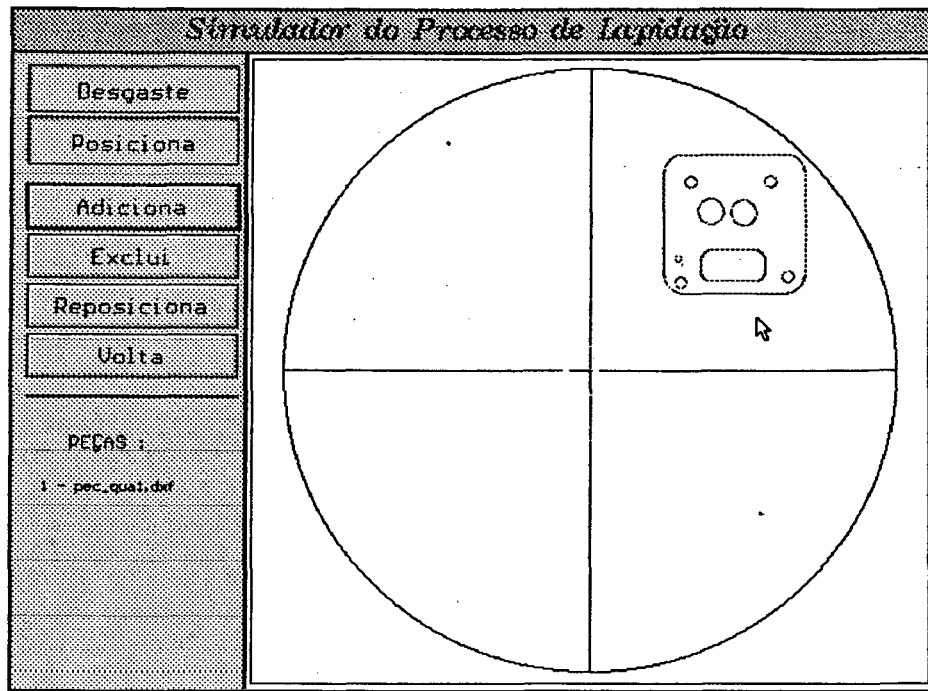


Figura - 5.14: Tamanho inicial da peça e seu posicionamento na gaiola.

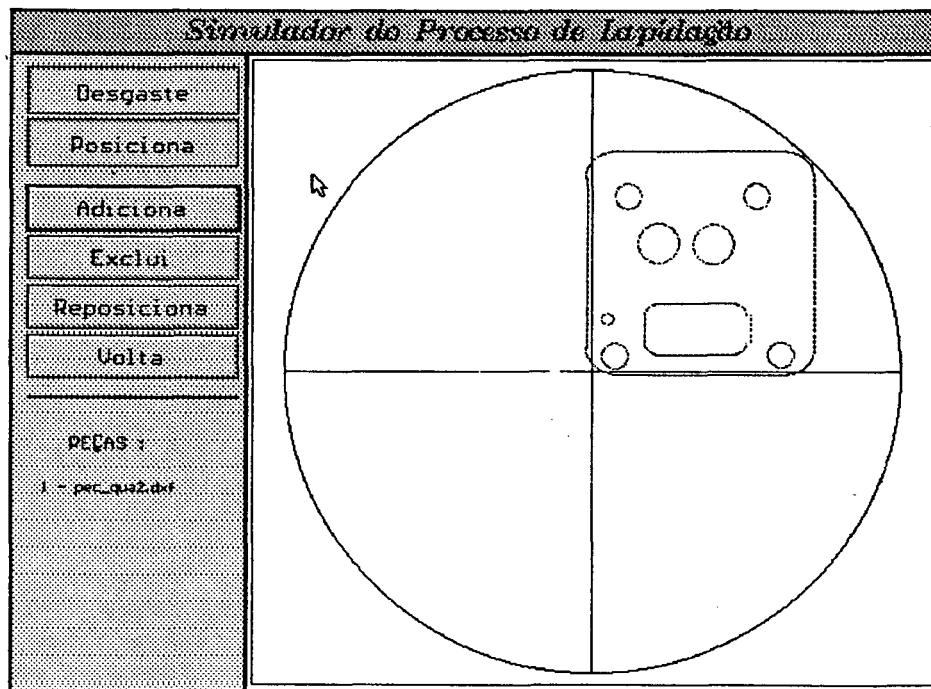


Figura - 5.15: Tamanho final da peça e seu posicionamento na gaiola.

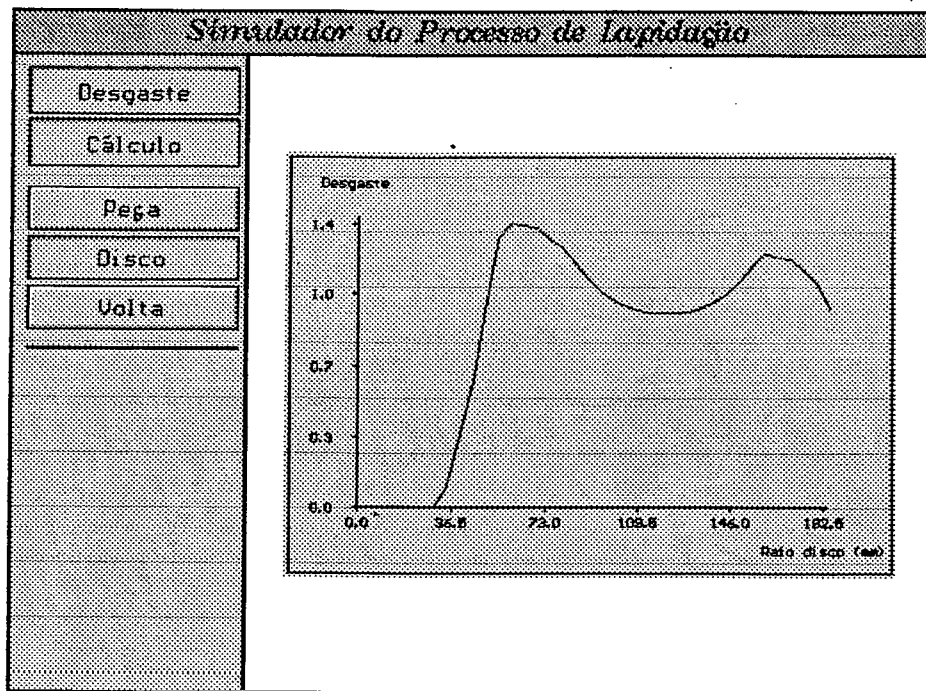


Figura - 5.16: Desgaste do disco para a geometria inicial

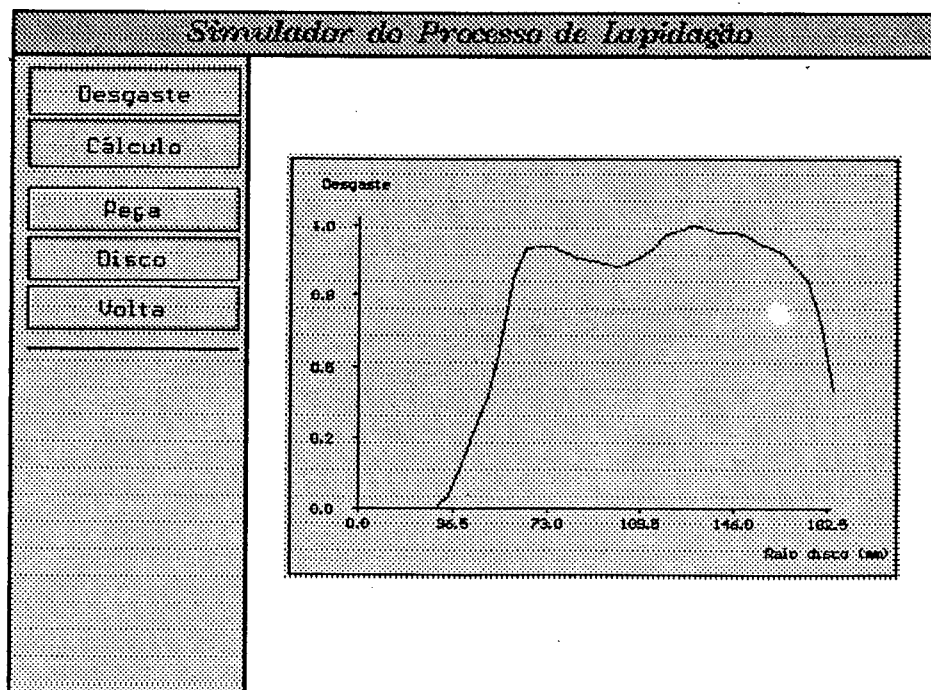


Figura - 5.17: Desgaste do disco para a geometria final da peça

Com relação a forma da peça, a figura 5.18 mostra uma peça cilíndrica posicionada na gaiola. O desgaste do disco para esta geometria é mostrada na figura 5.19.

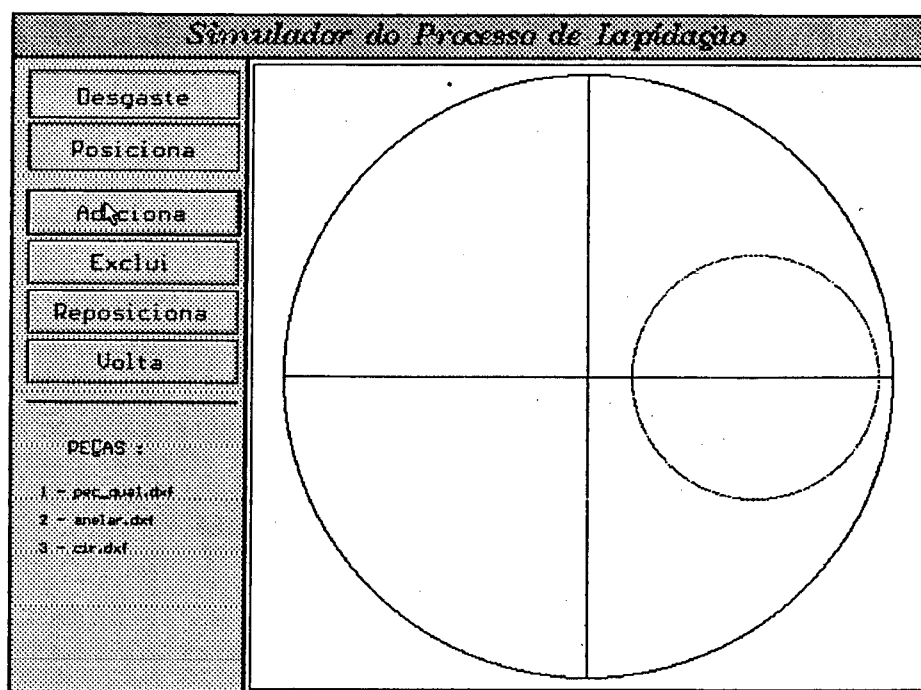


Figura - 5.18: Posicionamento de uma peça cilíndrica.

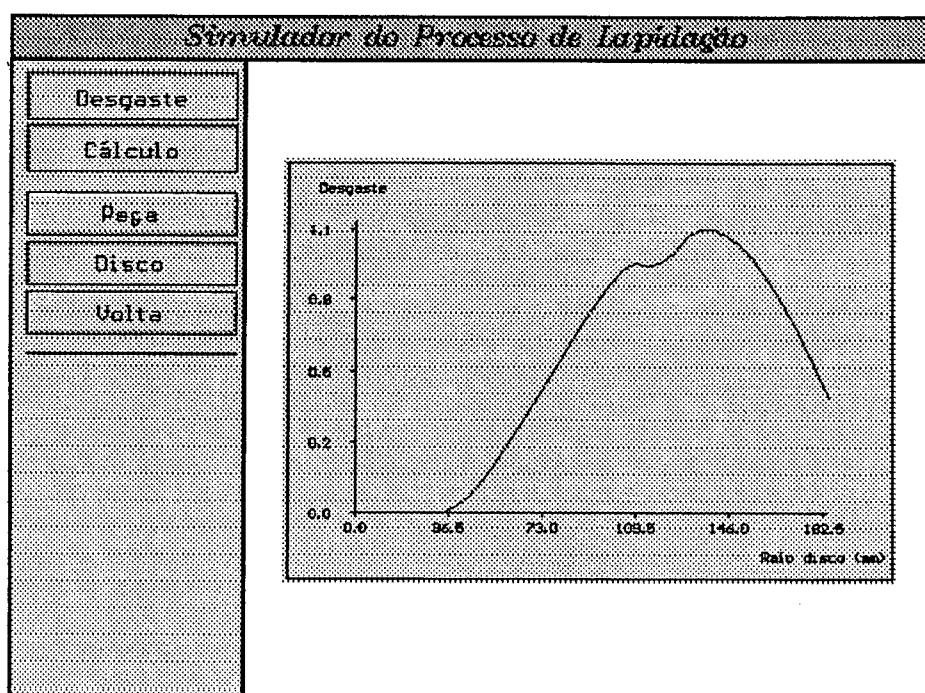


Figura - 5.19: Desgaste do disco de lapidação para a figura acima.

Mudando-se a geometria da peça para uma cilíndrica anelar, mas com o mesmo diâmetro, conforme mostra a figura 5.20.

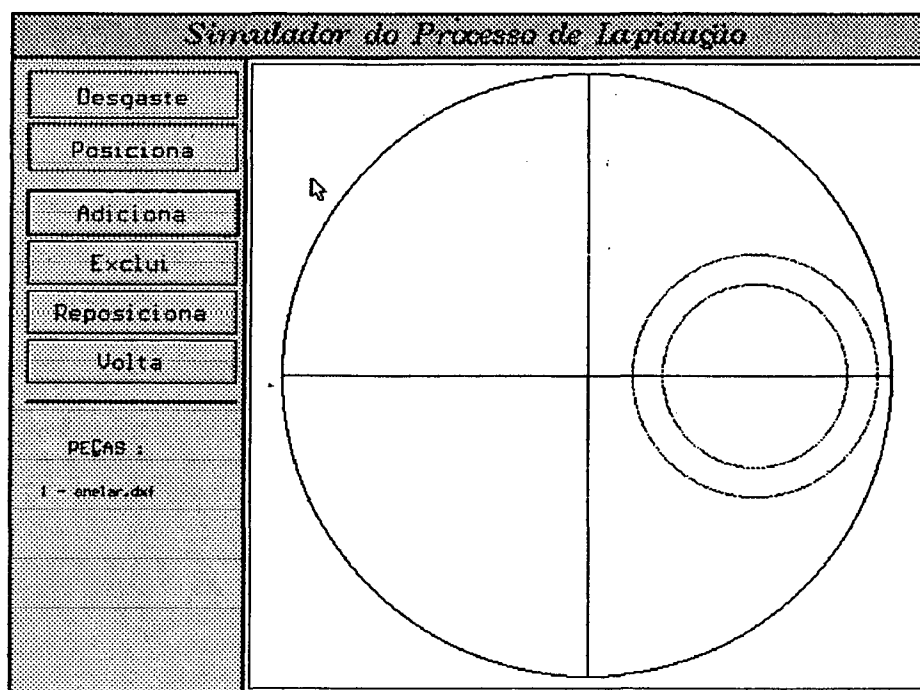


Figura - 5.20: Peça cilíndrica anelar posicionada na gaiola.

A figura 5.21 mostra o desgaste do disco de lapidação para a peça cilíndrica. Embora a tendência de desgaste do disco de lapidação permaneça o mesmo, o perfil de desgaste muda, tornando-se mais acentuado na região que coincide com o centro da gaiola. O que mostra que a geometria da peça influe na forma de desgaste do disco de lapidação.

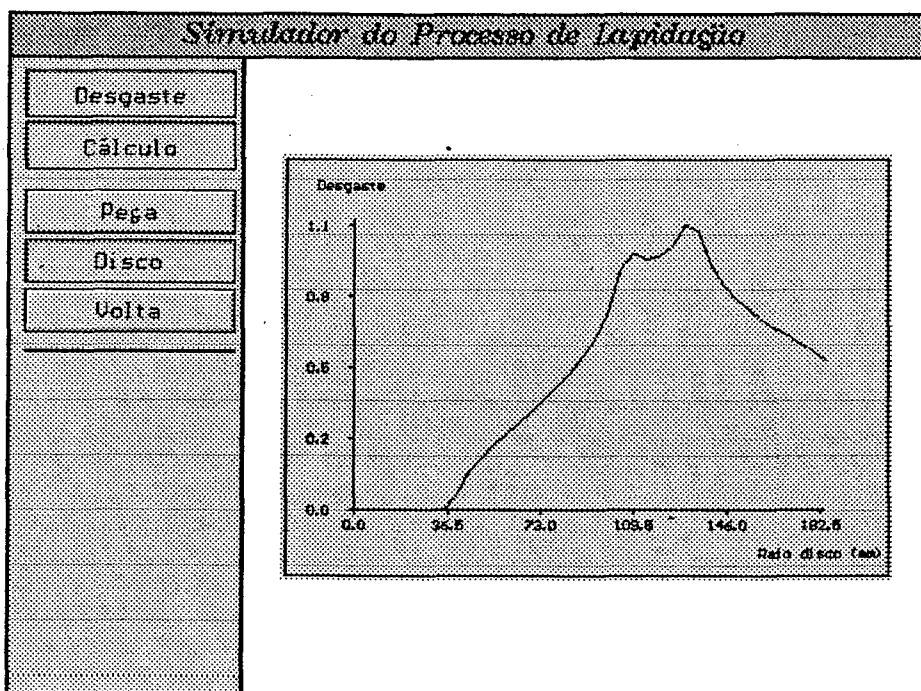


Figura - 5.21: Desgaste do disco de lapidação para a figura acima.

### 5.2.3 - POSICIONAMENTO DE PEÇAS COM GEOMETRIA DIFERENTES

O posicionamento correto das peças na gaiola é outro fator importante na determinação do desgaste do disco de lapidação. A figura 5.22, mostra a distribuição de dois tipos de peças com o mesmo tamanho, 4 peças cilíndricas posicionadas na periferia da gaiola e 4 anelares posicionadas mais no centro. Para uma dada condição de lapidação o desgaste do disco de lapidação para esta configuração é mostrada na figura 5.23.



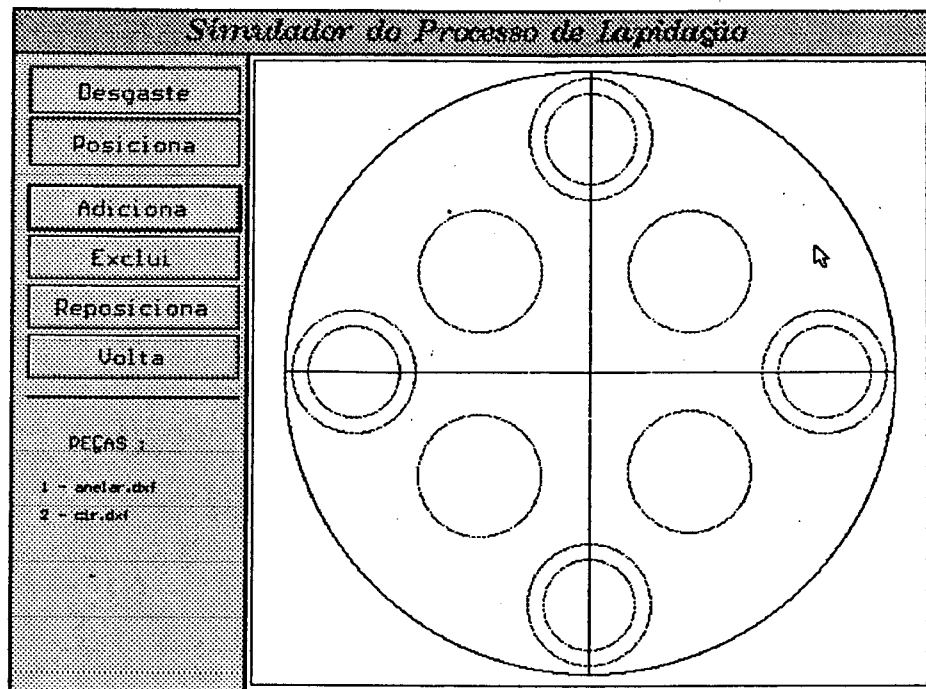


Figura - 5.22: Posicionamento de peças na gaiola.

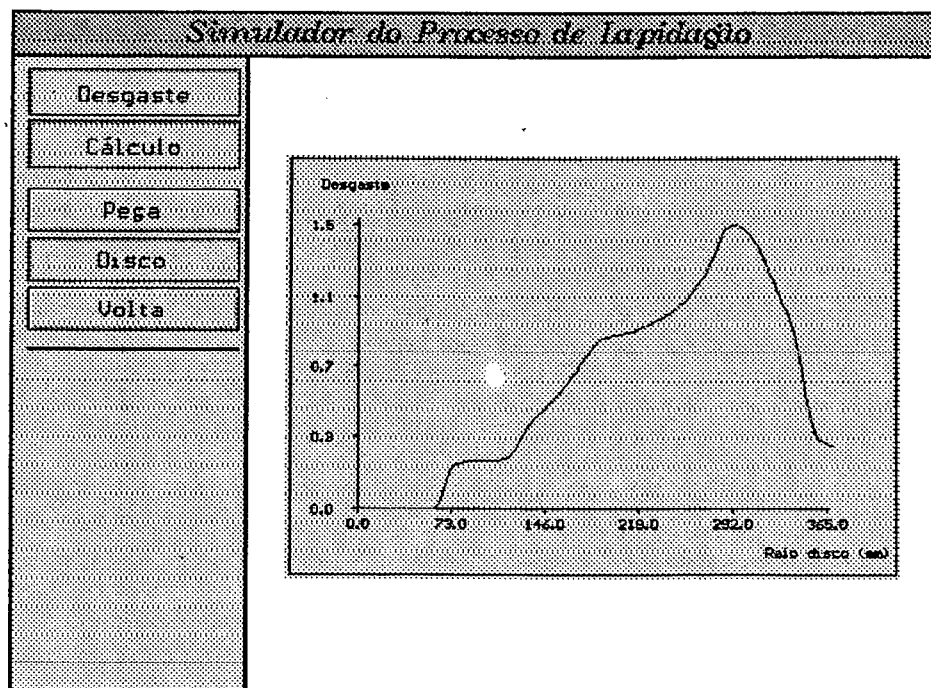


Figura - 5.23: Desgaste do disco de lapidação para a configuração mostrada na figura 5.22.

Trocando-se de posição as peças anelares com as cilíndricas, conforme a figura 5.24, observa-se o perfil do desgaste do disco de lapidação muda. A figura 5.25 mostra este perfil, onde o desgaste passa a ser mais distribuído, em relação ao perfil da figura 5.23.

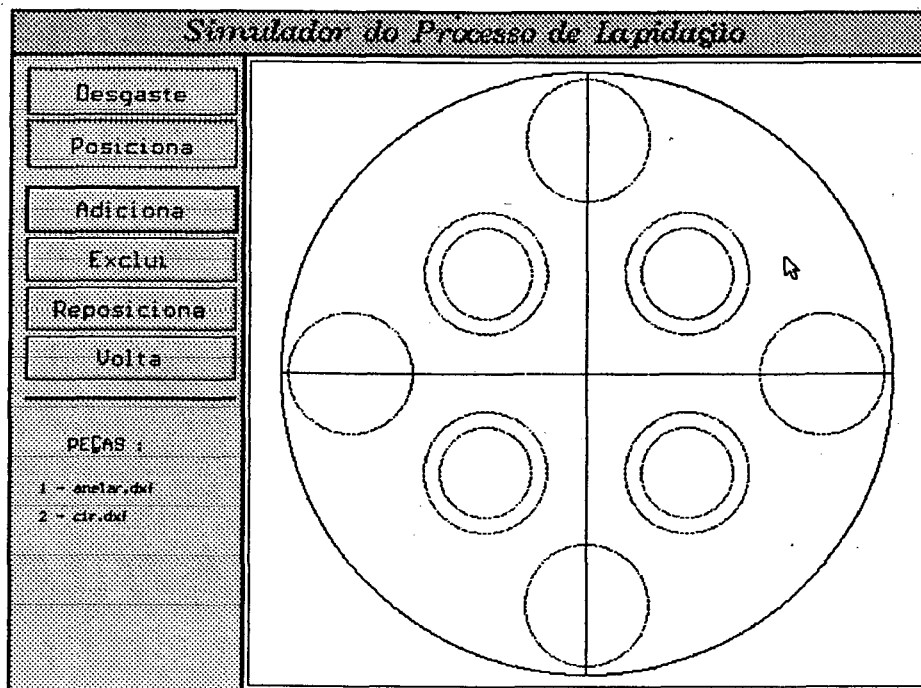


Figura - 5.24: Disposição das peças na gaiola.

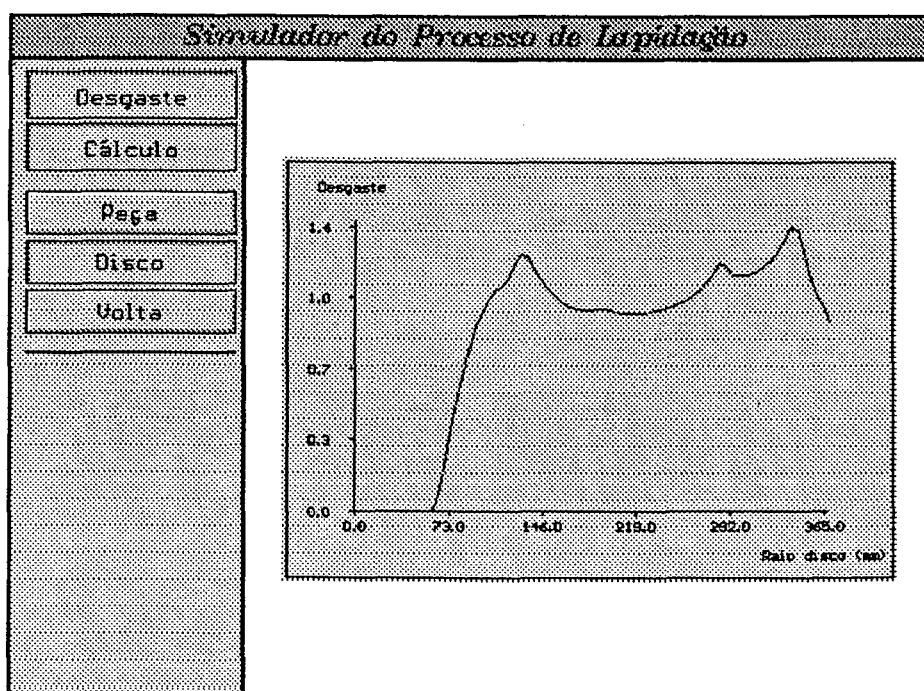


Figura - 5.25: Desgaste do disco de lapidação para a configuração mostrada na figura 5.24.

### 5.2.4 - MUDANÇA DAS VELOCIDADES

Durante o processo de lapidação os parâmetros mais facilmente controláveis na obtenção de um desgaste uniforme do disco de lapidação, para um dado posicionamento das peças na gaiola são as componentes de velocidade. A escolha correta das velocidades é de sobremaneira importante, também, para a obtenção de uma desejada remoção do disco pelos anéis de dressamento.

#### - EM FUNÇÃO DO POSICIONAMENTO DAS PEÇAS NA GAIOLA.

A figura 5.26 mostra as condições iniciais de lapidação para a lapidação de peças posicionadas segundo a figura 5.27.

*Simulador do Processo de Lapidação*

|  |  |                                 |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
|--|--|---------------------------------|---------|---------------------|------|--|------|--|------|---|-------|---|--------|---------------------------------|-----|-----------------------------------|------|---------------------------------|------|--|--|
| Definições   | <p><i>Definição dos dados de lapidação</i></p> <table border="1"> <tr> <td>Raio do disco de lapidação (mm)</td> <td>: 182,6</td> </tr> <tr> <td>Raio da gaiola (mm)</td> <td>: 81</td> </tr> <tr> <td>Velocidade do disco de lapidação (rpm)</td> <td>: 30</td> </tr> <tr> <td>Velocidade da engrenagem interna (rpm)</td> <td>: 29</td> </tr> <tr> <td>Distância centro disco - centro gaiola (mm)</td> <td>: 115</td> </tr> <tr> <td>Distância centro gaiola - ponto peça (mm)</td> <td>: 11,8</td> </tr> <tr> <td>Nº de dentes engrenagem interna</td> <td>: 8</td> </tr> <tr> <td>Nº de dentes engrenagem da gaiola</td> <td>: 28</td> </tr> <tr> <td>Nº de dentes engrenagem externa</td> <td>: 52</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <input type="button" value="Ler"/> <input type="button" value="Gravar"/> <input type="button" value="Sair"/> </td> </tr> </table> | Raio do disco de lapidação (mm) | : 182,6 | Raio da gaiola (mm) | : 81 | Velocidade do disco de lapidação (rpm) | : 30 | Velocidade da engrenagem interna (rpm) | : 29 | Distância centro disco - centro gaiola (mm) | : 115 | Distância centro gaiola - ponto peça (mm) | : 11,8 | Nº de dentes engrenagem interna | : 8 | Nº de dentes engrenagem da gaiola | : 28 | Nº de dentes engrenagem externa | : 52 | <input type="button" value="Ler"/> <input type="button" value="Gravar"/> <input type="button" value="Sair"/> |  |
| Raio do disco de lapidação (mm)  |  | : 182,6                         |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Raio da gaiola (mm)  |  | : 81                            |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Velocidade do disco de lapidação (rpm)   |  | : 30                            |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Velocidade da engrenagem interna (rpm)   |  | : 29                            |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Distância centro disco - centro gaiola (mm)  | : 115  |                                 |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Distância centro gaiola - ponto peça (mm)  | : 11,8   |                                 |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Nº de dentes engrenagem interna  | : 8  |                                 |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Nº de dentes engrenagem da gaiola  | : 28   |                                 |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Nº de dentes engrenagem externa  | : 52   |                                 |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| <input type="button" value="Ler"/> <input type="button" value="Gravar"/> <input type="button" value="Sair"/> |  |                                 |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Trajetoória  |  |                                 |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Velocidade   |  |                                 |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Desgaste   |  |                                 |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |
| Saída  |  |                                 |         |                     |      |  |      |  |      |   |       |   |        |                                 |     |                                   |      |                                 |      |  |  |

Figura - 5.26: Condições iniciais de lapidação.

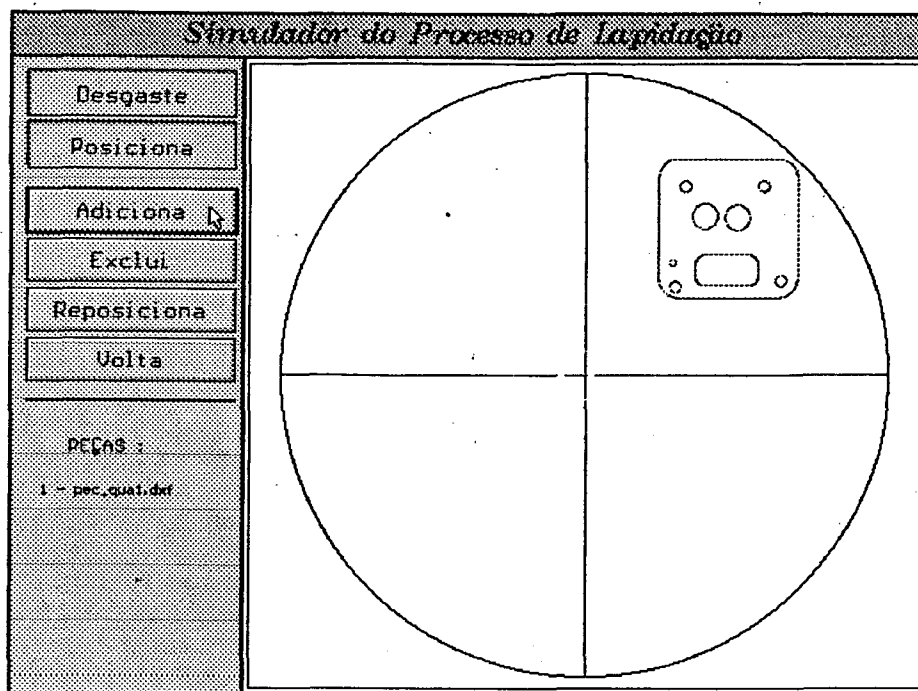


Figura - 5.27: Posicionamento da peça na gaiola.

Para as condições iniciais o desgaste do disco de lapidação tende a ser mais pronunciado na parte periférica do disco como é mostrado na figura 5.28.

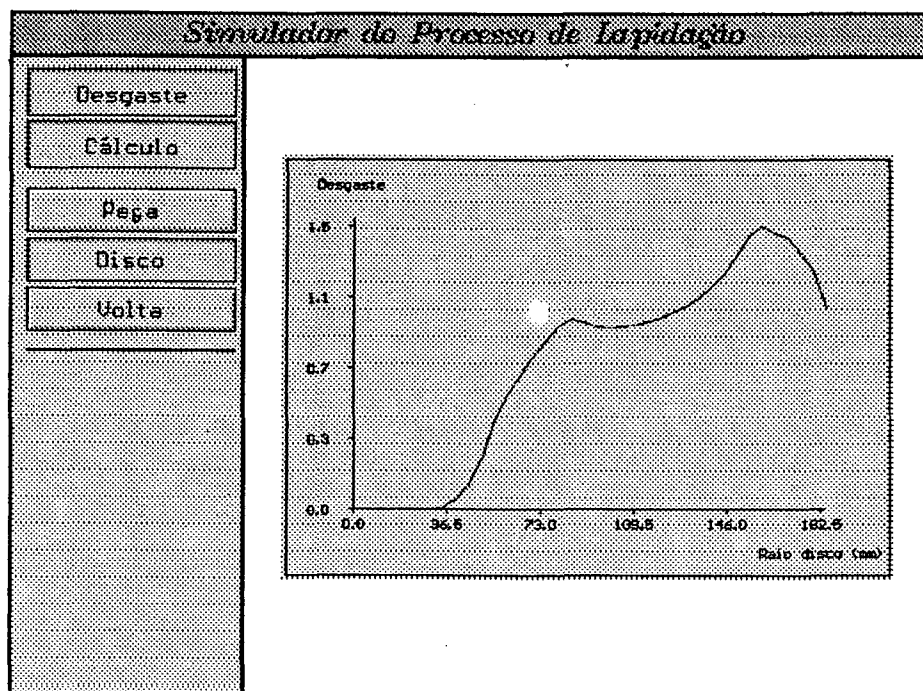


Figura - 5.28: Desgaste mais acentuado na periferia do disco de lapidação.

Diminuindo-se a componente de velocidade do disco de lapidação para 6 RPM, o desgaste do disco de lapidação tende a um desgaste mais homogêneo, como mostra a figura 5.29.

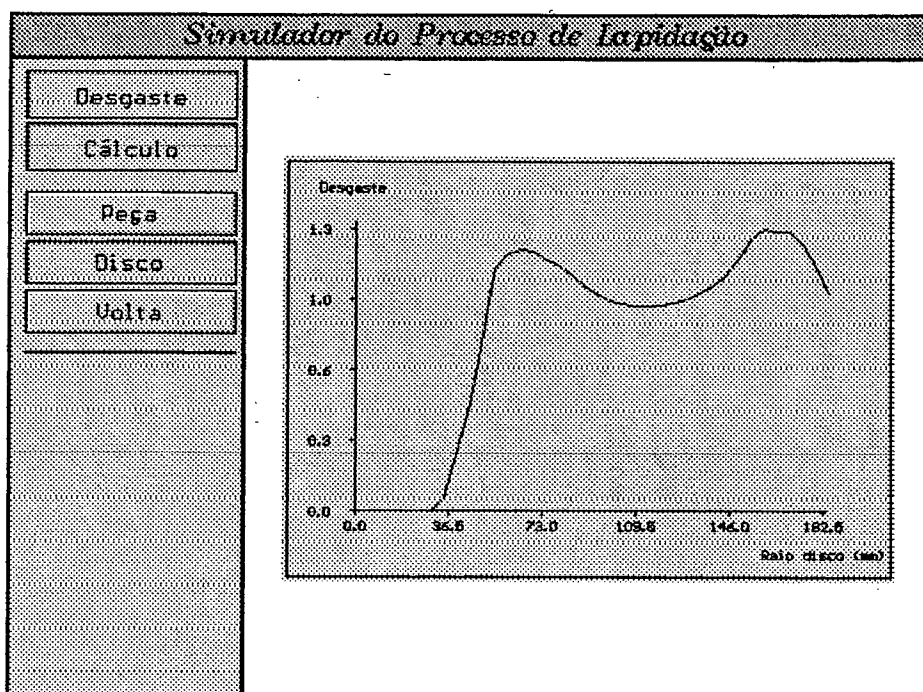


Figura - 5.29: Desgaste mais homogêneo do disco de lapidação.

Outra alternativa é gerar uma curva de desgaste do disco que somada a anterior tende a um desgaste homogêneo. Isto pode ser visto somando os figuras de desgaste dos gráficos 5.28, onde é obtido um desgaste maior na periferia, com o gráfico 5.30, onde o desgaste é mais acentuado na região central do disco de lapidação.

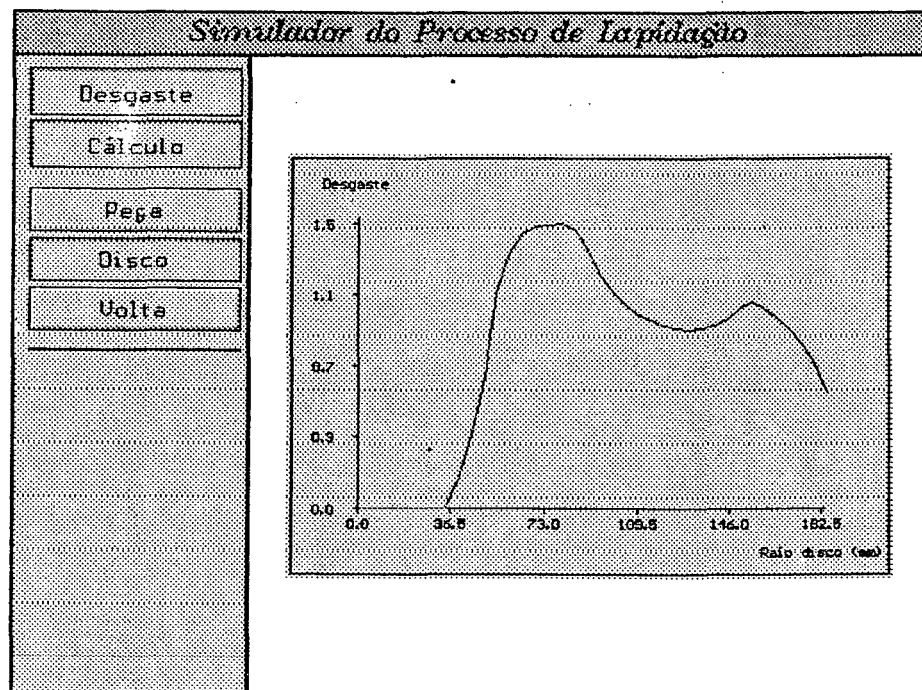


Figura - 5.30: Desgaste mais acentuado no centro do disco.

### - EM FUNÇÃO DO ANEL DE DRESSAMENTO

As gaiolas utilizadas para o posicionamento de peças, geralmente fabricadas de material plástico ou de madeira, praticamente não influem no desgaste do disco. Entretanto quando se emprega o anel de dressamento, fabricado de ferro fundido, este além de ser utilizado para a guiagem das peças tem o propósito de desgastar uniformemente o disco de lapidação. O anel de dressamento pode ser modelado como sendo um anel cilíndrico, figura 5.31. Para uma dada condição inicial, a figura 5.32 mostra o desgaste do disco de lapidação.

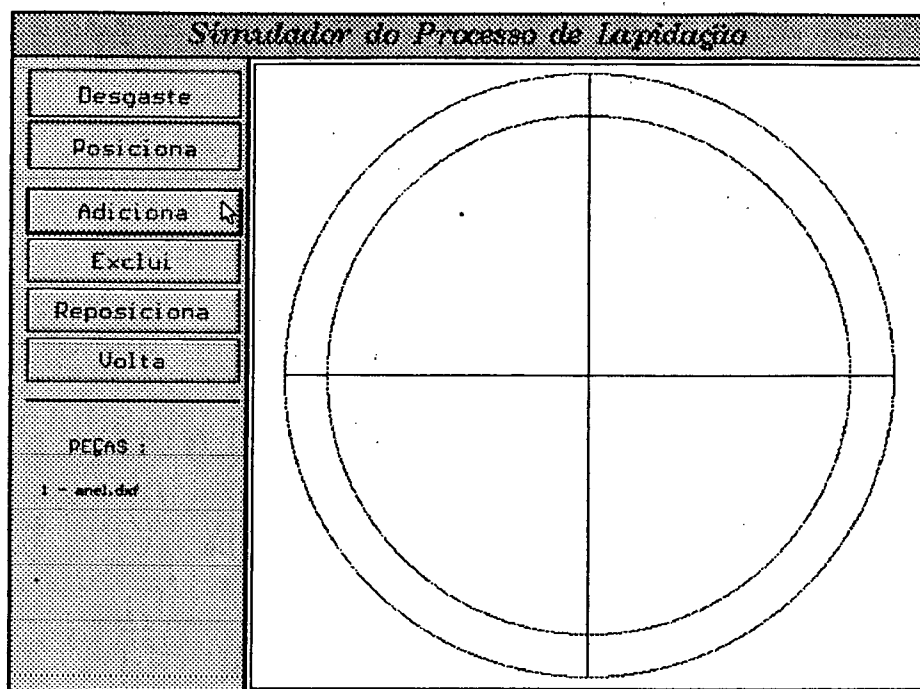


Figura - 5.31: Desenho do anel de dressamento.

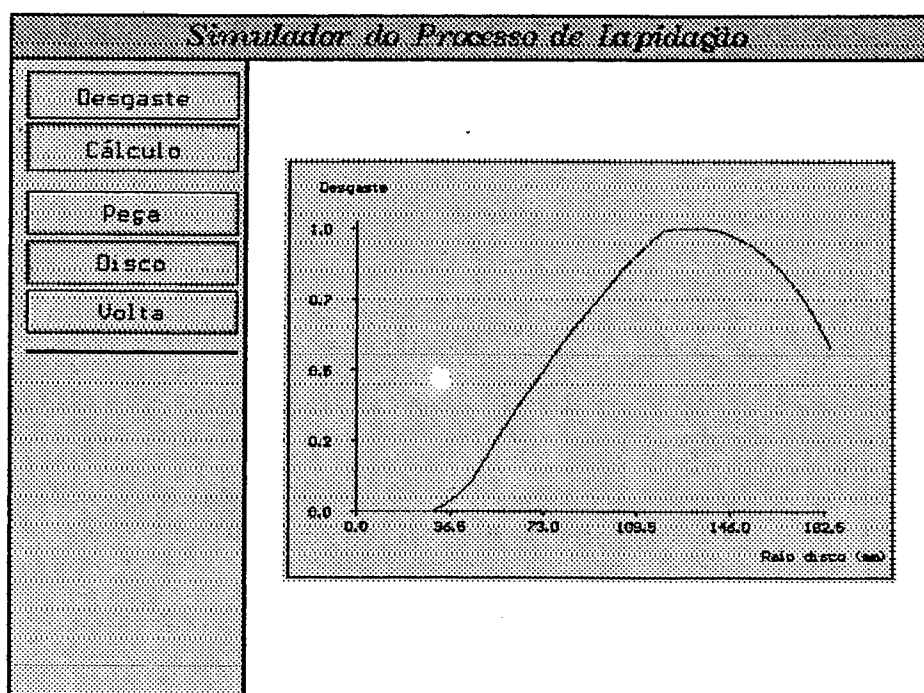


Figura - 5.32: Desgaste do disco de lapidação em função do anel de dressamento.

Novamente, modificando as componentes de velocidade do disco de lapidação para 6 RPM o desgaste se torna mais uniforme, figura 5.33.

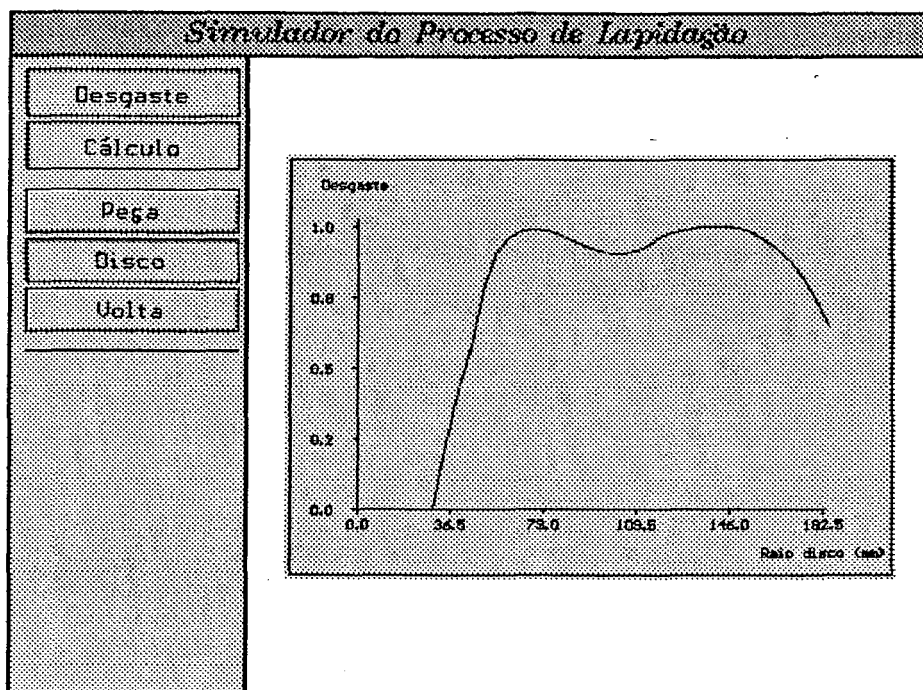


Figura - 5.33: Desgaste do disco de lapidação para uma nova condição.

## 5.2 - SIMULAÇÃO DA REMOÇÃO DA PEÇA

Como foi visto nos modelos estudados anteriormente, a remoção de material da peça depende de fatores cinemáticos e dinâmicos. Ela é proporcional à trajetória percorrida para um determinado ponto da peça. A simulação do comprimento de trajetória percorrido por cada conjunto de pontos com a mesma distância do centro da gaiola, mostra a tendência de remoção da peça lapidada.

A seguir é simulado o desgaste da peça em função de sua posição na gaiola, da velocidade e do tempo de lapidação.



### 5.2.2 - POSICIONAMENTO DA PEÇA NA GAIOLA

Conforme mostra a figura 5.34, para uma determinada condição de lapidação e geometria da peça, o seu posicionamento na periferia da gaiola, determina uma densidade de trajetória como mostrado na figura 5.35.

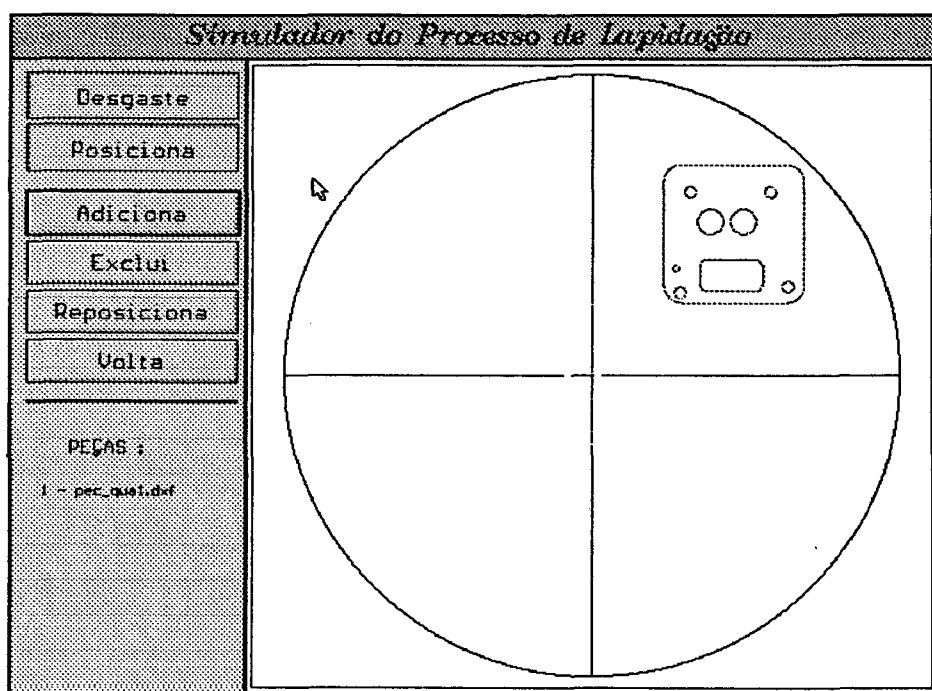


Figura - 5.34: Posicionamento da peça na periferia da gaiola.

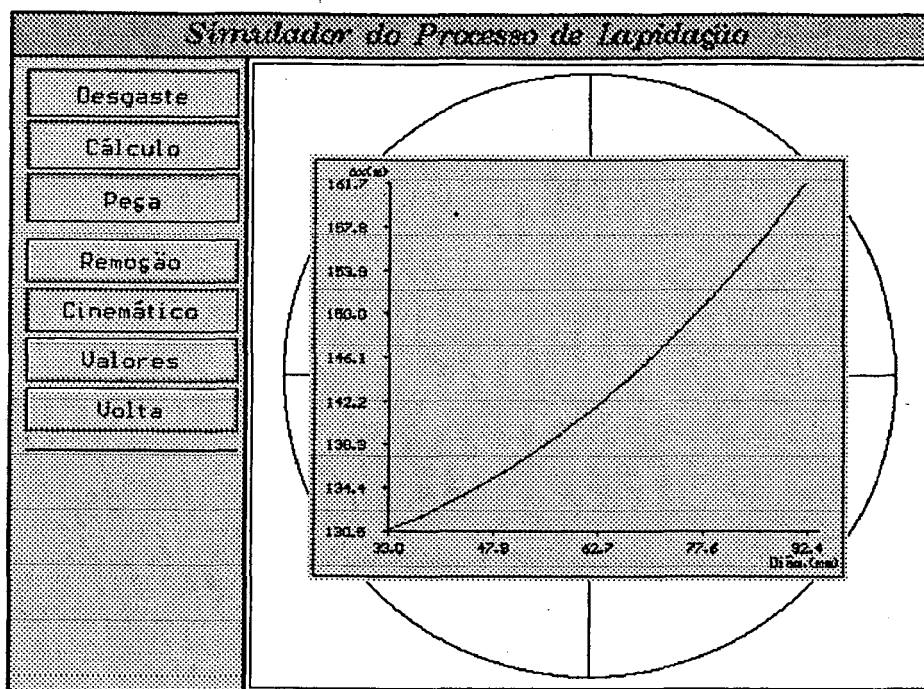


Figura - 5.35: Densidade de trajetória da peça posicionada na periferia da gaiola.

A figura 5.36 mostra uma peça posicionada mais no centro da gaiola.

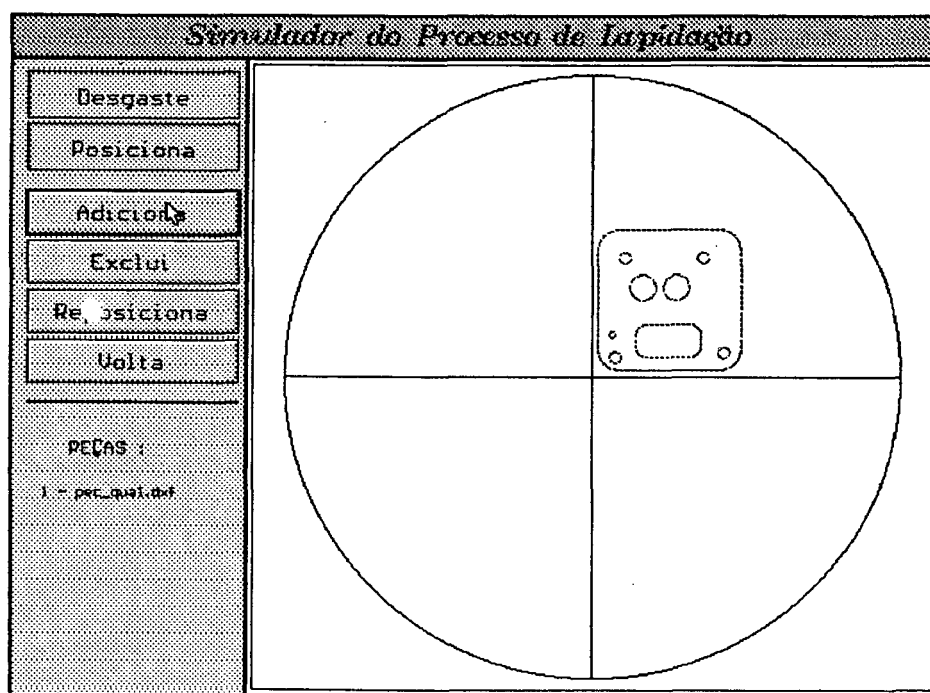


Figura - 5.36: Posicionamento da peça mais no centro da gaiola.

Através da análise da densidade de trajetória mostrada nas figuras 5.35 e 5.37, é visto que o ângulo entre a reta que passa pelos pontos extremos da peça e o eixo da abscissa, que é considerado como a base do sistema de medição, aumentou 98% aproximadamente com o afastamento da peça do centro da gaiola e com isso o erro de paralelismo.

Com relação a planicidade, a distância entre a reta que passa pelos pontos extremos da peça e a reta mais afastada e paralela a esta, mostra a tendência da planicidade das peças em função da distância percorrida por pontos da peças. Para as duas condições de posicionamento da peça na gaiola há a redução de cerca de 40% no erro de planicidade com o posicionamento da peça, também, na periferia da gaiola.

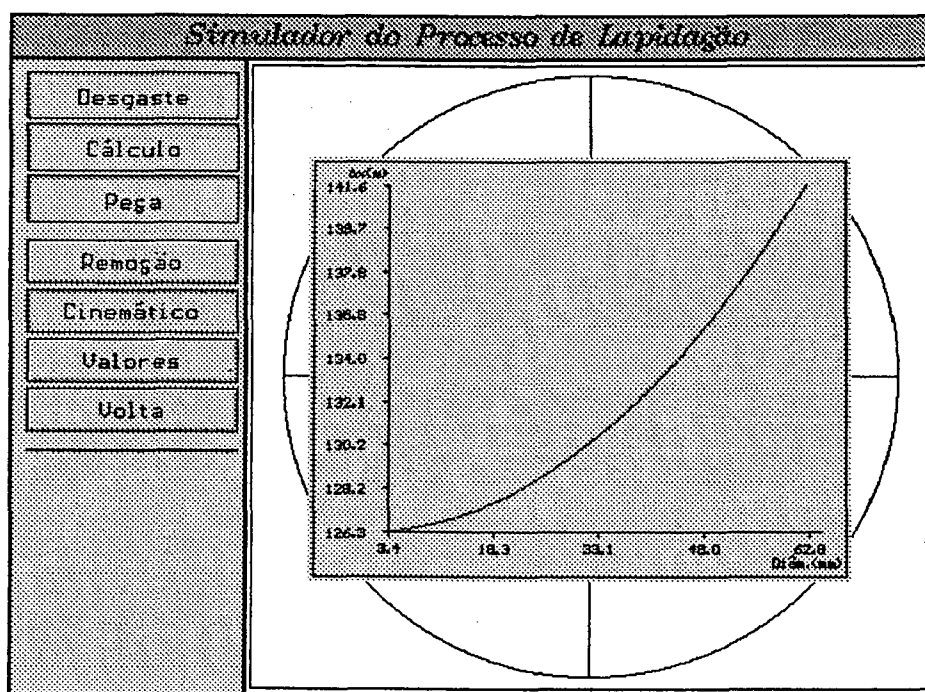


Figura - 5.37: Densidade de trajetória para a peça posicionada mais no centro da gaiola.

### 5.2.3 - COMPONENTES DE VELOCIDADES

As componentes de velocidades da lapidadora, velocidade da engrenagem externa e do disco de lapidação, também tem significativa influência sobre a densidade de trajetória da peça. Para a peça posicionada conforme a figura 5.34 e as condições iniciais, conforme a figura 5.38, é obtida a densidade de trajetória conforme a figura 5.35.

| Definição dos dados de lapidação            |       |
|---|-------|
| Rato do disco de lapidação (mm)             | 182.5 |
| Rato da gaiola (mm)                         | 91    |
| Velocidade do disco de lapidação (rpm)      | 38    |
| Velocidade da engrenagem interna (rpm)      | 29    |
| Distância centro disco - centro gaiola (mm) | 115   |
| Distância centro gaiola - ponto pega (mm)   | 11.8  |
| Nº de dentes engrenagem interna             | 8     |
| Nº de dentes engrenagem da gaiola           | 23    |
| Nº de dentes engrenagem externa             | 52    |

Figura - 5.38: Condições de lapidação.

Modificando-se o valor da velocidade do disco de lapidação para 6 RPM, já que como visto, esta velocidade leva a um desgaste mais homogêneo do disco, obtém-se o gráfico da densidade de trajetória conforme a figura 5.39.

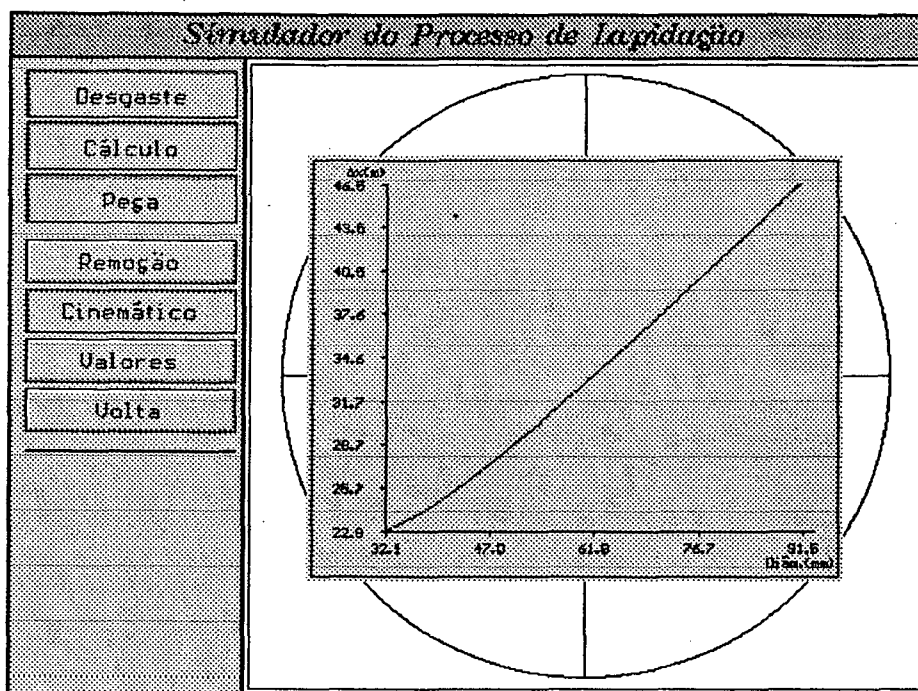


Figura - 5.39: Densidade de trajetória para a modificação da velocidade.

Analisando os gráficos das figuras 5.35 e 5.39, é visto que, embora a velocidade do disco de lapidação de 6 RPM leve a um desgaste homogêneo do disco, a distância média percorrida pela peça é menor do que para a velocidade de 39 RPM, 34 e 146 metros respectivamente. Consequentemente, como a remoção de material é proporcional ao comprimento de trajetória percorrida, o tempo de lapidação aumenta para a mesma sobremedida de material cerca de 4,3 vezes. Entretanto o erro de planicidade decresce aproximadamente 54% assim como o erro de paralelismo diminui 22%.

### 5.2.3 - TEMPO DE LAPIDAÇÃO

O tempo é um parâmetro primordial na lapidação. Experimentalmente o aumento do tempo de lapidação leva ao aumento do erro de paralelismo para determinadas condições. Para condições constantes, a figura 5.40 mostra a densidade de trajetória para o tempo de 2 min. de lapidação e configuração conforme a figura 5.34.

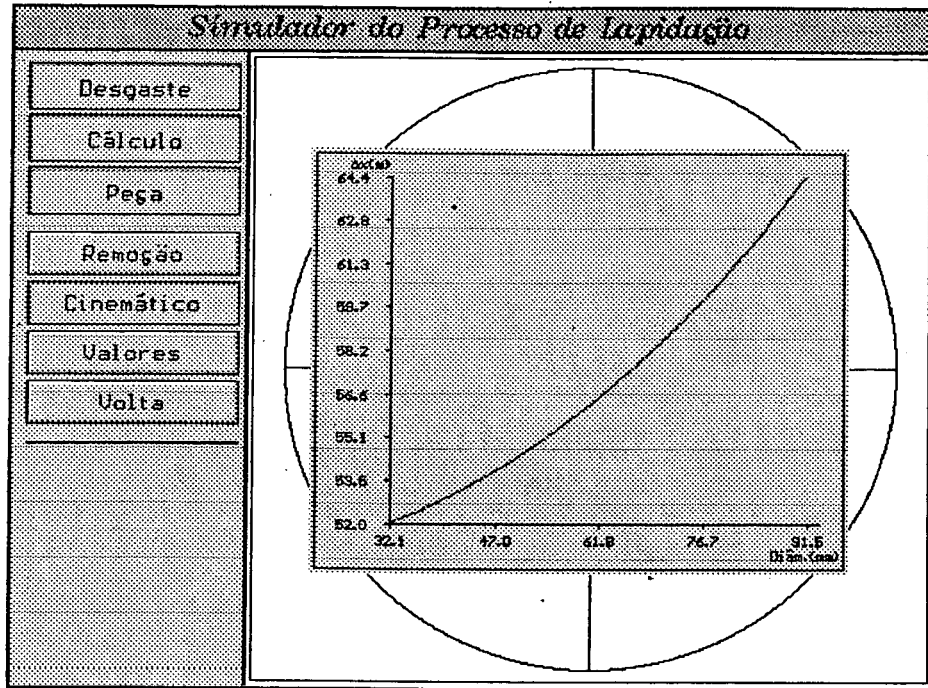


Figura - 5.40: Densidade de trajetória para 2 min. de lapidação.

Aumentando-se o tempo de lapidação para 10 min, o gráfico de densidade de trajetória muda conforme a figura 5.41, tendendo ao aumento do erro de paralelismo de 293%. Com relação ao erro de planicidade não é notada uma mudança significativa com o aumento do tempo de lapidação.

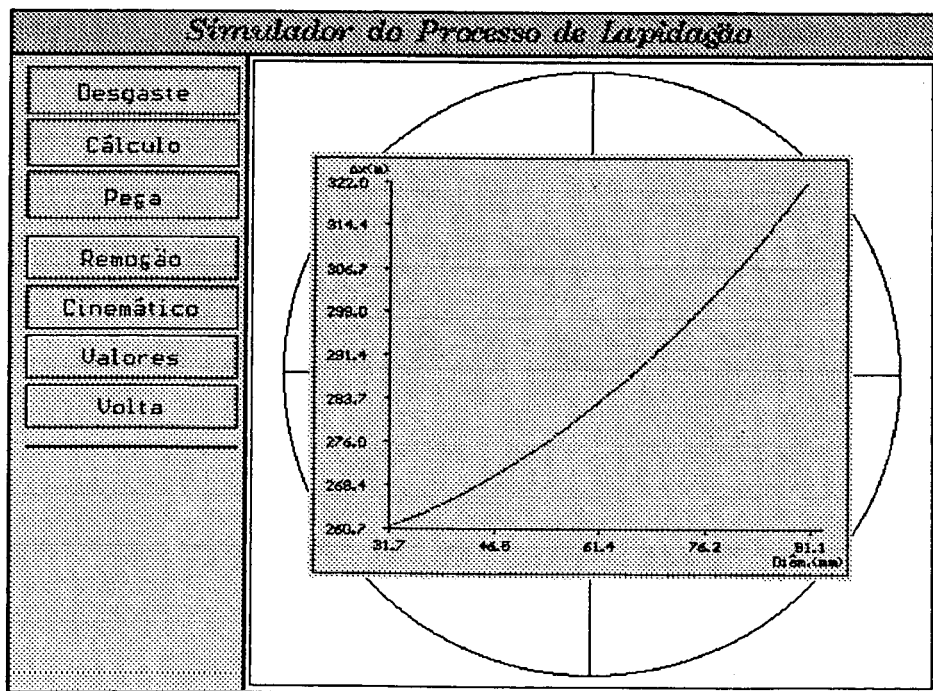


Figura - 5.41: Densidade de trajetória para 10 min. de lapidação.

### 5.2.4 - TAMANHO DA PEÇA

O aumento do tamanho da peça, mantendo os outros parâmetros constantes, influe também nos erros de planicidade e paralelismo. A figura 5.42 mostra o posicionamento de uma peça menor e a figura 5.43 o gráfico da densidade de trajetória. Simulando o processo para uma peça com tamanho maior, figura 5.44, se obtém um gráfico de densidade de trajetória como mostra a figura 5.45.

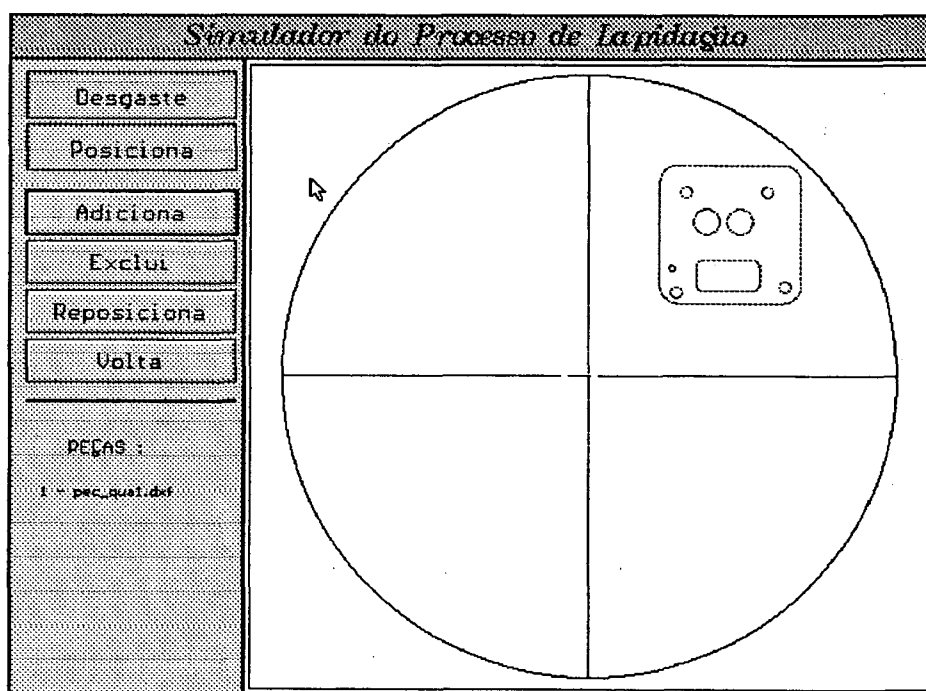


Figura - 5.42: Posicionamento da peça pequena na periferia da gaiola.

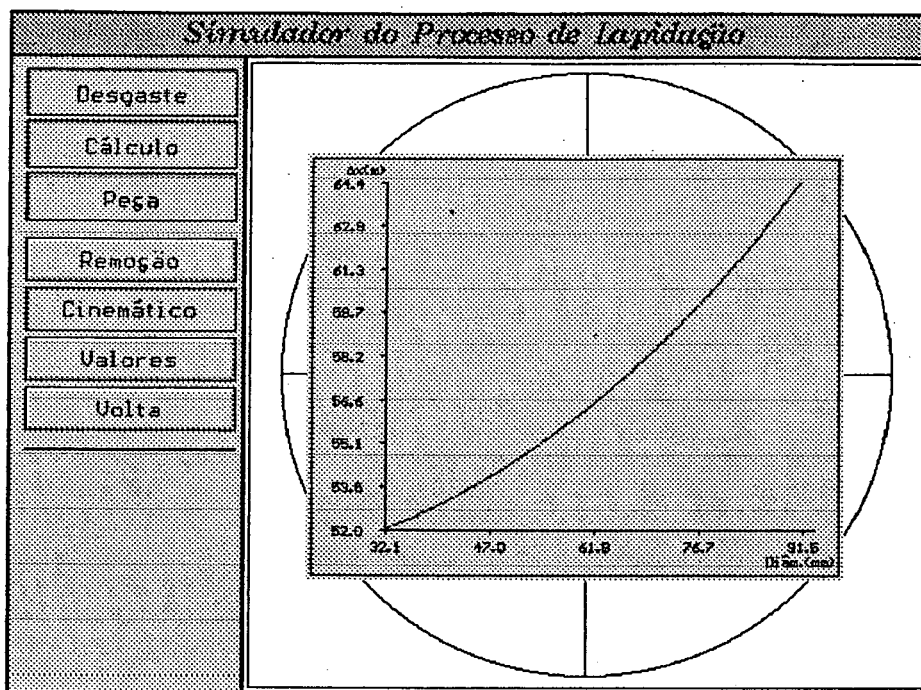


Figura - 5.43: Densidade de trajetória para a peça pequena posicionada na periferia da gaiola.

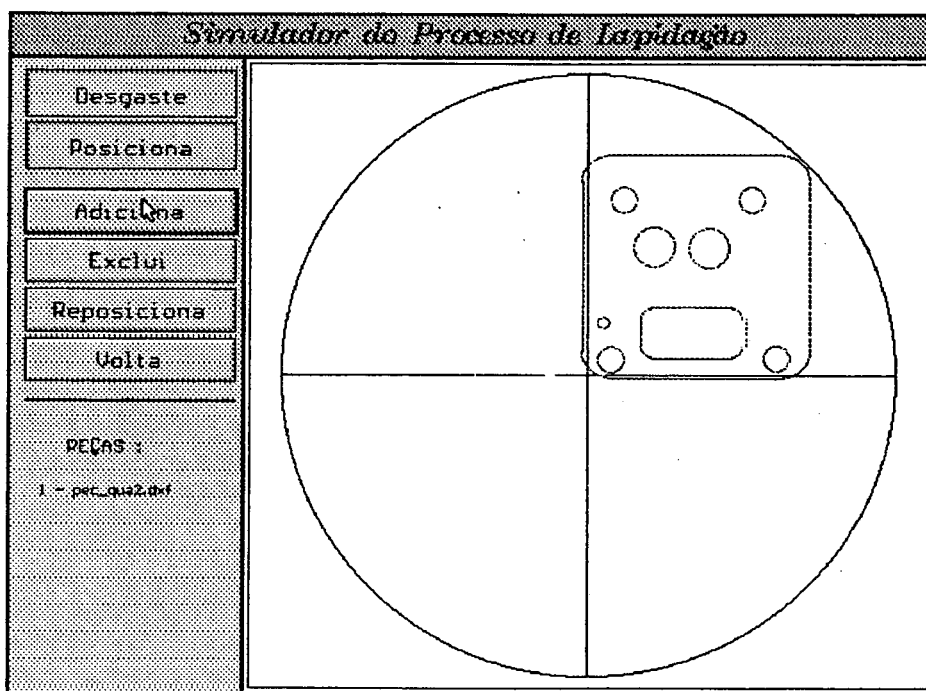


Figura - 5.44: Posicionamento da peça grande na gaiola.



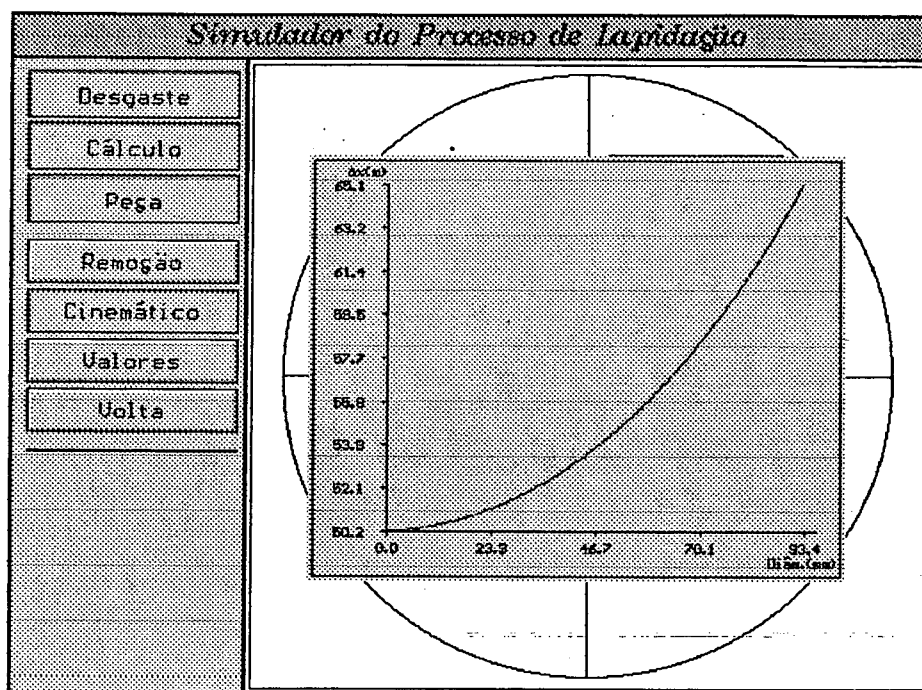


Figura - 5.45: Densidade de distribuição de trajetória para a peça grande.

Analisando as figuras 5.43 e 5.45 é visto que o erro de paralelismo diminui cerca de 25% com o aumento do tamanho da peça, mantendo os outros parâmetros constantes. Entretanto o erro de planicidade aumenta 200% com o aumento do tamanho da peça e o posicionamento das peças.

## **CAPÍTULO 6**

### **VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL**

#### **6.1 - OBJETIVOS**

O objetivo da verificação experimental é determinar a influência dos principais parâmetros do processo sobre a remoção de material, erros de planicidade e paralelismo da peça lapidada, de forma qualitativa, visando uma comparação com os resultados obtidos na simulação da cinemática do processo. É também verificado o comportamento da rugosidade com a variação dos parâmetros do processo.

Neste estudo é utilizado como corpo de prova o componente de compressor rotativo, de ferro fundido GG20, fabricado pela Embraco ( Empresa Brasileira de Compressores ), conforme mostra a figura 6.1. Na superfície do corpo de prova a ser ensaiado é feito um rebaixo, no intuito de aumentar as pressões de contato. A característica superficial inicial para ensaio é obtida através da retificação de cada peça. A face superior é usada como uma superfície de medição e por isso é, também, retificada. Para que o corpo de prova não gire em relação à gaiola, e com isso seja possível realizar o estudo da influência dos parâmetros cinemáticos no processo, este é furado lateralmente e preso através de um pino em um rasgo da gaiola.

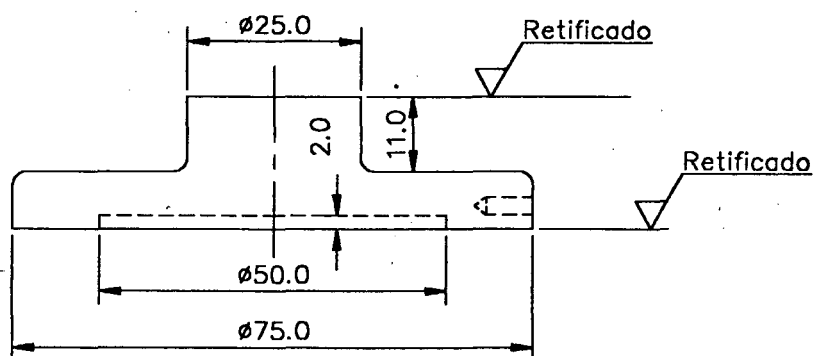


Figura -6.1: Dimensões do corpo de prova.

## 6.2 - CONDIÇÕES DE ENSAIO

A escolha dos níveis dos parâmetros de entrada é feita de acordo com as possibilidades e o usual na indústria. Como meio de lapidação são empregados grãos abrasivos de carboneto de silício com granulometria F 1000, suspensos em óleo mineral, utilizado pela Embraco, com viscosidade de 0,0124 Pa.s `a 18 °C. É empregado também óleo mineral MA-5 com viscosidade de 0,0237 Pa.s `a 18 °C. Com relação a concentração, são analisadas as seguintes relações: 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:10. Durante a execução do ensaio é empregado a alimentação contínua do meio de lapidação, através de sua adição à medida que este vai sendo contaminado e jogado para fora do disco de lapidação.

A pressão de lapidação é obtida através da aplicação de massas sobre o corpo de prova. É feita uma combinação de 4 massas diferentes de: 1,2; 1,4; 2,3 e 2,0 kg, somado ao peso do anel, utilizado para distribuir melhor o peso sobre corpo de prova. Com isso são obtidas as seguintes pressões: 12,8; 21,2; 31,0; e 46,0 kPa. A figura 6.2 mostra a aplicação de carga sobre o corpo de prova.

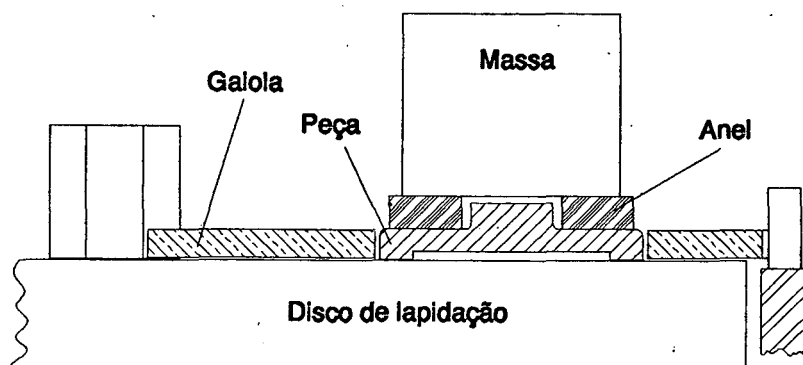


Figura - 6.2 :Esquema utilizado para distribuição dos pesos sobre o corpo de prova.

Para a determinação do comportamento da rugosidade e remoção de material em função do tempo, são feitas medidas após 2; 5; 10; 15 e 20 minutos de lapidação. A velocidade do disco de lapidação utilizada é de 39 RPM, levando a uma velocidade linear média do corpo de prova de 29 m/min.

O posicionamento da peça na gaiola é feito conforme utilizado na indústria, onde parte da peça transpassa o disco, com o objetivo de levar o meio de lapidação contaminado para fora da região de trabalho, favorecendo assim sua renovação na fenda de trabalho. A figura 6.3 mostra o posicionamento do alojamento da peça.

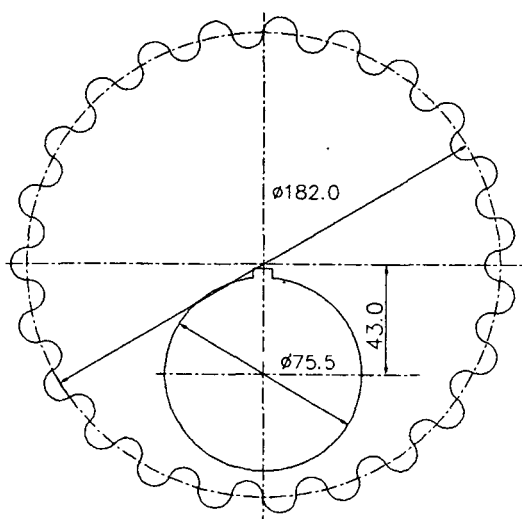


Figura - 6.3: Posicionamento da peça na gaiola.

### 6.3 - EQUIPAMENTOS DE ENSAIO

Para a realização dos ensaios é utilizada uma lapidadora plana, com acionamento por engrenamento, projetada e construída no Laboratório de Mecânica de Precisão. Esta possui um motor elétrico, que através de um conjunto redutor de velocidades e um sistema de polias aciona o disco de lapidação, conforme mostra a figura 6.4.

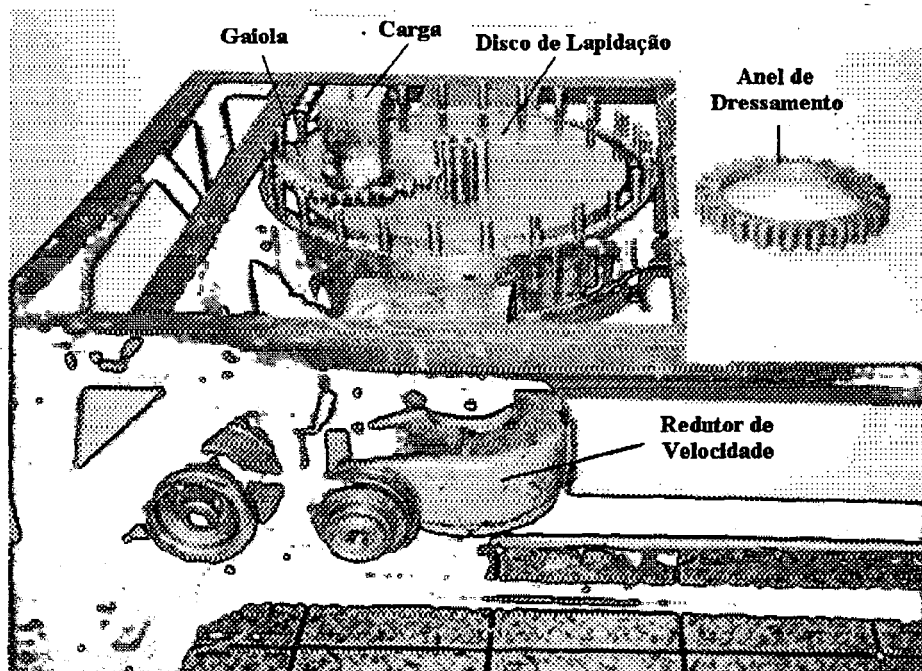


Figura - 6.4: Fotografia da lapidadora empregada nos ensaios.

Nesta lapidadora, o disco de lapidação gira com a mesma velocidade angular da engrenagem interna, já a engrenagem externa é fixa a estrutura da lapidadora e não gira. Esta lapidadora tem as seguintes características:

- .Material do disco de lapidação: Ferro fundido cinzento
- .Velocidades do disco: 23, 39, 68 RPM
- .Número de dentes da engrenagem externa: 52
- .Número de dentes da gaiola: 23
- .Número de dentes da engrenagem interna: 6

Dimensões:

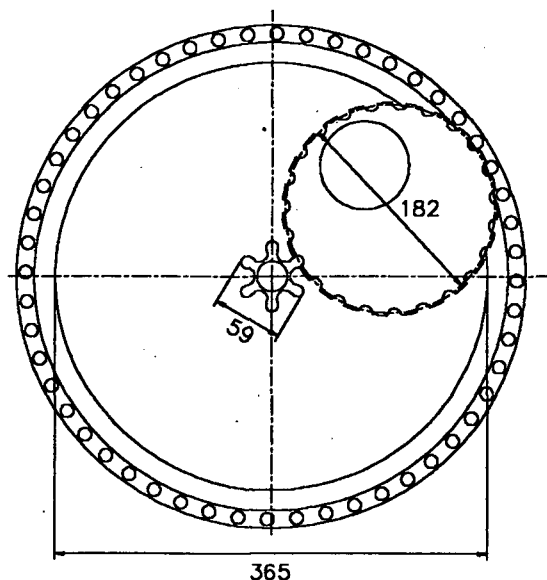


Figura - 6.5: Dimensões da lapidadora plana LMP

Para a retificação dos corpos de prova, é utilizada uma retificadora plana modelo MWM, empregando um rebolo: A 200x30x75 DIN 69126 A 60 L 10 B 45, com velocidade angular de 3600 RPM e velocidade da mesa de 3 m/min.

#### 6.4 - GRANDEZAS DE SAÍDA ANALISADAS

Os resultados obtidos durante o experimento serão apresentados em forma de gráficos. Onde são analisadas a rugosidade e remoção de material em função do tempo de lapidação, velocidade, distância percorrida, posição de medição, meio de suspensão, concentração do meio de lapidação e pressão. Serão analisados, também, erros de planicidade e paralelismo em função do tempo e da pressão.

## 6.5 - METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

### 6.5.1- MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

Para a medição de rugosidade serão empregados os parâmetros  $R_a$  e  $R_z$ , uma vez que são menos influenciados por perturbações aleatórias e por isso atualmente mais utilizados [28].

A medição de rugosidade feita em seis posições do corpo de prova ( posições 0, 1, 2, 3, 4 e 6), conforme a figura 6.6. O ponto 0 coincide com o furo do alojamento do pino na peça e na gaiola, de modo que este seja a posição mais próxima do centro da gaiola.

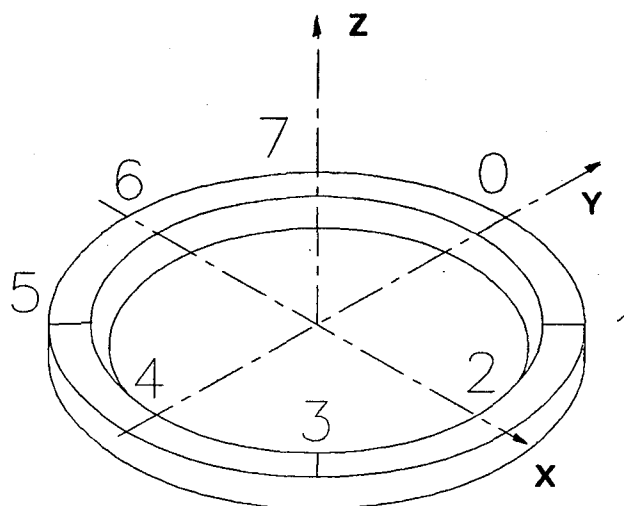


Figura - 6.6: Sistema de referência para a medição do corpo de prova.

### 6.5.2- MEDIÇÃO DA REMOÇÃO

Para a medição de remoção de material é empregado o método da medição diferencial. Utilizando um relógio comparador milesimal montado na coluna de medição, e com blocos padrões de diferentes tamanhos, a remoção é obtida através da comparação da alturas medidas das posições do corpo de prova com um bloco padrão. A medida é realizada através da linha radial de cada posição, através da média entre a maior e menor altura. Este procedimento de remoção é feito somente para a medição na posição 0. Sendo as outras posições medidas em relação à este.

A figura 6.7 mostra o dispositivo empregado para a medição da remoção dos corpos de prova.

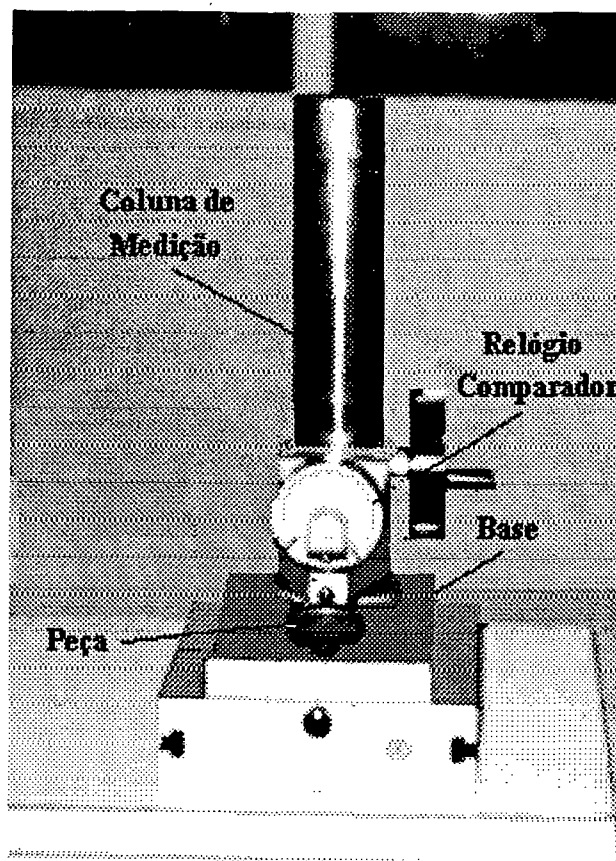


Figura - 6.7: Dispositivo para medição de remoção.

## 6.6 - EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

O equipamento utilizado para a medição de rugosidade é um rugosímetro, modelo Perthometer S8P, fabricado pela Feinpruef Gmb H, Alemanha.

Para a medição da remoção é utilizado um relógio comparador milesimal, modelo Mikrokator 500 A-4 , fabricado pela CEJ - Suécia, montado em uma coluna de medição. Também são utilizados blocos padrão de classe 2.

## 6.7 - CÁLCULO DO ERROS DE PLANICIDADE E PARALELISMO

A determinação dos erros de planicidade e de paralelismo é realizada através da medição da altura de cada posição do corpo de prova, em relação ao posição 0. Estes são implementados em um software que calcula os erros. A seguir é descrita a metodologia empregada no software.



### 6.7.1 - CÁLCULO DO ERRO DE PLANICIDADE

O ensaio geométrico de planicidade visa determinar os desvios da superfície da peça. Para a determinação do plano de referência é utilizado o método dos mínimos quadrados, onde a equação do plano é dada por:

$$Z = aX + bY + c \quad (43)$$

onde  $a, b, c$  são os coeficientes do plano. Então, o desvio  $\delta Z_i$  da planicidade em relação ao plano ajustado de cada posição medida é definido como:

$$\delta Z_i = Z_i - aX_i - bY_i - c \quad (44)$$

para  $i = 1, 2, \dots, n$ , onde  $n$  é o número total de pontos. O valor mais alto de  $\delta Z_i$  com relação ao plano ajustado é definido o ponto onde está contido o plano superior, enquanto o mais abaixo define o plano inferior. O erro de planicidade é definido então, como a distância entre o plano superior e o inferior. A figura 6.8 mostra o plano ajustado e os planos superior e inferior em ZX.

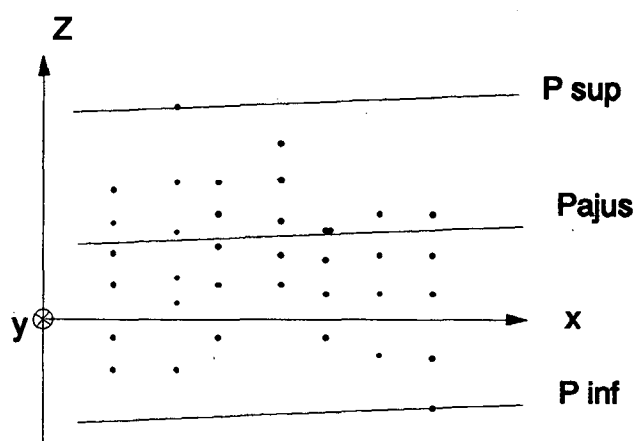


Figura - 6.8 : Determinação do erro de planicidade [30].

### 6.7.2 - CÁLCULO DO ERRO DE PARALELISMO

Para a determinação do erro de paralelismo, a condição necessária é que os planos padrão de cada elemento verificado devem ser paralelos [31]. Neste caso toma-se como plano padrão, o plano de base do sistema de medição e a face superior do corpo de prova. A figura 6.7 mostra o erro de paralelismo entre dois planos, sendo este indicado pelos ângulos gerados entre o erro de paralelismo segundo  $x$  e  $y$  ( $\lambda x$  e  $\lambda y$ ).

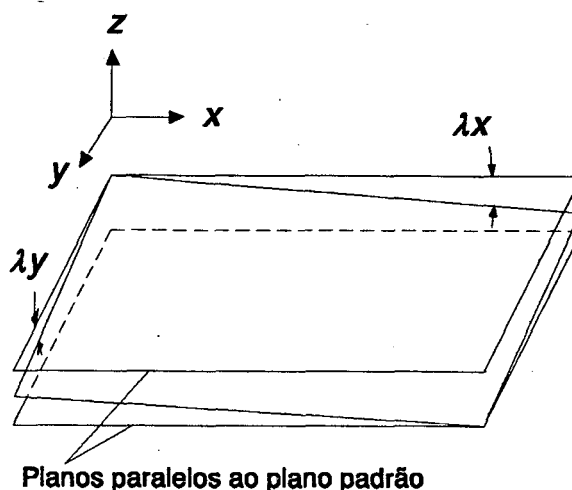


Figura - 6.9 : Determinação do erro de paralelismo entre planos [31].

### 6.8 - METODOLOGIA DE ENSAIO

Com o intuito de verificar a influência das variáveis do processo, pressão de lapidação, concentração, tempo de lapidação e meio de suspensão sobre a qualidade superficial, remoção de material e erros de paralelismo e planicidade é feita uma combinação das variáveis entre si. Utilizando a técnica conhecida como "um por vez", onde apenas uma das variáveis sofre alteração, mantendo-se constantes as demais, verifica-se assim a sua influência sobre o processo.

A tabela 6.1 mostra a combinação destes parâmetros.

Tabela - 6.1: Relação dos parâmetros de ensaio.

| Experimento | Pressão (kPa) | Conc. (abras.:óleo) |
|-------------|---------------|---------------------|
| 1           | 12,8          | 1:4                 |
| 2           | 21,2          | 1:4                 |
| 3           | 31,0          | 1:4                 |
| 4           | 45,6          | 1:4                 |
| 5           | 21,2          | 1:10                |
| 6           | 21,2          | 1:5                 |
| 7           | 21,2          | 1:4                 |
| 8           | 21,2          | 1:3                 |
| 9           | 21,2          | 1:2                 |

Nos ensaios da influência da variação da concentração é empregado o óleo hidráulico MA-5 como meio de suspensão. Já na análise da influência da pressão é utilizado o óleo mineral empregado pela Embraco em seu processo.

Para o início de cada ensaio é feito uma minuciosa limpeza do disco de lapidação, de modo que as impurezas do processo anterior não influenciem nos resultados, principalmente no início do trabalho.

Cada ensaio é realizado somente uma vez, com o objetivo de levantar as tendências do processo. A realização dos experimentos, desde a preparação de cada corpo de prova até a medição é um processo demorado, o que dificulta a repetição para cada condição.

## **CAPÍTULO 7**

### **ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Neste capítulo é analisada a influência dos parâmetros de entrada do processo, como: tempo de lapidação, comprimento de trajetória, velocidade, concentração e tipo do meio de lapidação e pressão entre a peça e o disco de lapidação, sobre a rugosidade e remoção do ferro fundido GG20. Para tal é utilizado o método da análise de variância como ferramenta estatística. É analisada, também, a influência do tempo e da pressão de lapidação sobre os erros de planicidade e paralelismo.

#### **7.1 - INFLUÊNCIAS SOBRE A RUGOSIDADE E REMOÇÃO**

##### **7.1.1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO**

A figura 7.1 mostra o aumento da remoção com o aumento do tempo, para diferentes pressões. Esta tendência já era esperada, uma vez que a alimentação contínua leva a renovação do meio de lapidação na fenda de trabalho, mantendo assim sua capacidade de remoção. É notado que a remoção de material nos minutos iniciais do processo é mais acentuada. Isto ocorre devido a eliminação dos picos de rugosidade inicial proveniente do processo de retificação, utilizado na preparação dos corpos de prova.

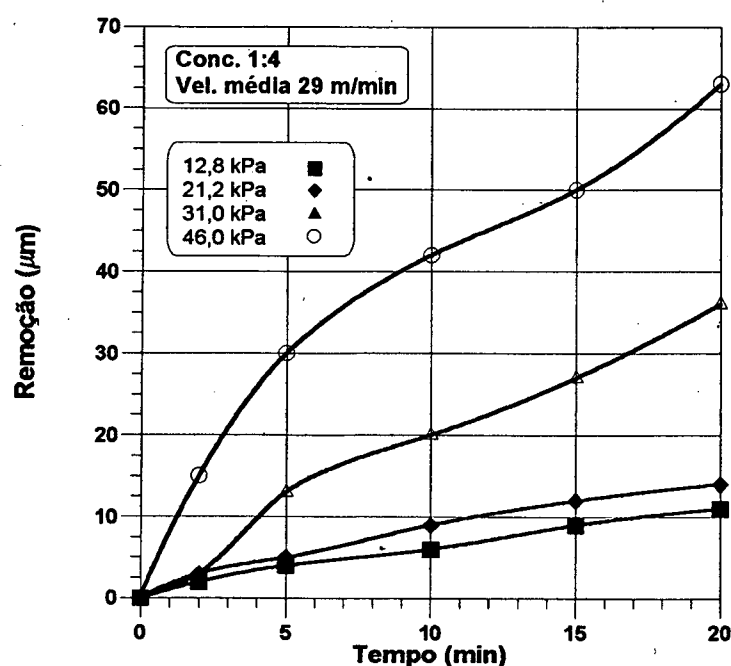


Figura - 7.1: Remoção em função do tempo para diferentes pressões.

As figuras 7.2 e 7.3 mostram os gráficos das rugosidades  $R_a$  e  $R_z$  em função do tempo para diferentes pressões. É possível notar, que para o gráfico de  $R_a$  há uma queda rápida de rugosidade logo no minutos iniciais de lapidação, independente da pressão e da rugosidade inicial, para abaixo de um determinado patamar. Entretanto para a rugosidade  $R_z$ , observa-se que para a pressão de 31,0 kPa há a tendência da diminuição de  $R_z$  nos minutos iniciais do processo e uma estabilização. Contudo para as outras pressões não é notada tal tendência de comportamento com o aumento do tempo de lapidação.

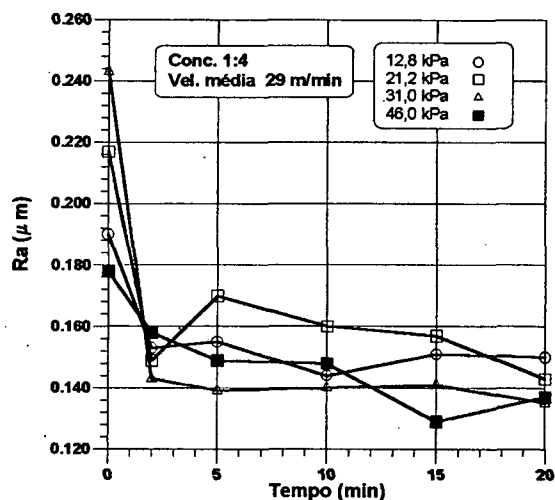


Figura 7.2: Ra em função do tempo para diferentes pressões.

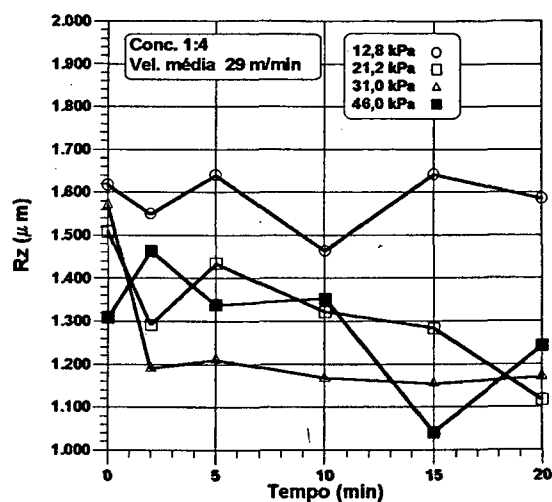


Figura - 7.3: Rz em função do tempo para diferentes pressões.

### 7.1.2 - INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE TRAJETÓRIA E DA VELOCIDADE MÉDIA DE UM PONTO DA PEÇA.

Através da análise da variância, para uma determinada condição de ensaio, anexo B, verifica-se que a posição da medição de rugosidade não influe nos resultados, ou seja, a rugosidade não é afetada por fatores cinemáticos.

Na determinação da remoção em função do comprimento de trajetória são feitas medições de remoção de material na posição 0 do corpo de prova. Utilizando o software de simulação, são calculados os comprimentos de trajetórias em função do tempo de lapidação para esta posição, figura 7.4. Como é visto, o aumento do comprimento de trajetória leva ao aumento da remoção.

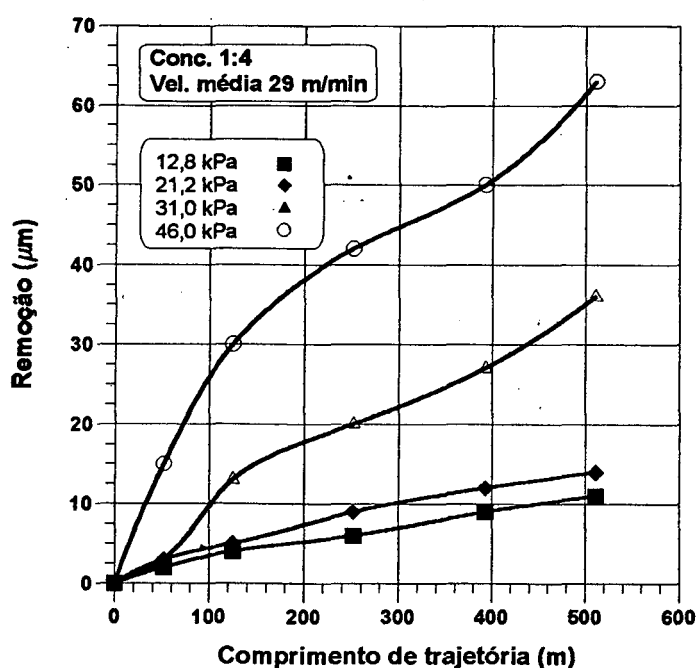


Figura - 7.4: Remoção em função do comprimento de trajetória para diferentes pressões.

Entretanto, calculando a remoção em função do tempo, ou do comprimento de trajetória das outras posições de medição do corpo de prova, nota-se uma remoção mais acentuada se comparando com a remoção para o mesmo comprimento de trajetória do ponto 0. A figura 7.5 mostra o gráfico da remoção em função do comprimento de trajetória percorrida por pontos do corpo de prova após 20 min de lapidação. As posições 1 e 7; 2 e 6; 3 e 5 percorrem a mesma forma e o mesmo comprimento de trajetória. Por isso a remoção é calculado através da média de cada conjunto de posições. A posição 4 não é analisada pelo fato de não percorrer todo o comprimento de trajetória calculado, uma vez que este ponto do corpo de prova transpassa o disco de lapidação.

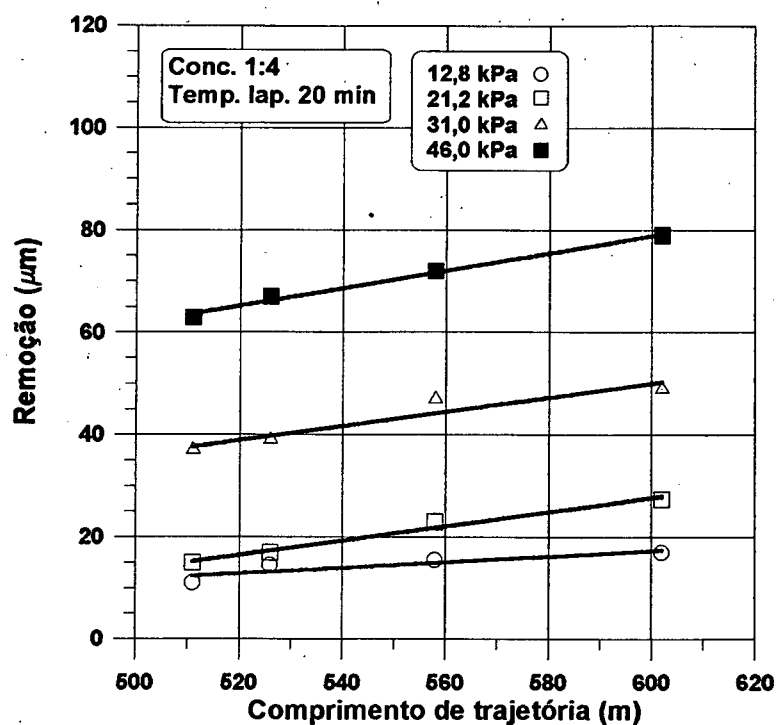


Figura - 7.5: Remoção em função do comprimento de trajetória.

Uma explicação para o fato que a remoção medida nas várias posições não é igual a remoção calculada através da extrapolação do gráfico da remoção na posição 0, para os mesmos comprimentos de trajetória, é o fato dos pontos do corpo de prova possuírem velocidades diferentes ao longo do tempo, com o aumento da distância em relação ao centro da gaiola. No Anexo C são mostrados os gráficos de velocidade em função do tempo para as posições de medição.

A figura 7.6 mostra a média da remoção em função da velocidade média dos pontos medidos. É clara a tendência do aumento da remoção em função do aumento da velocidade.



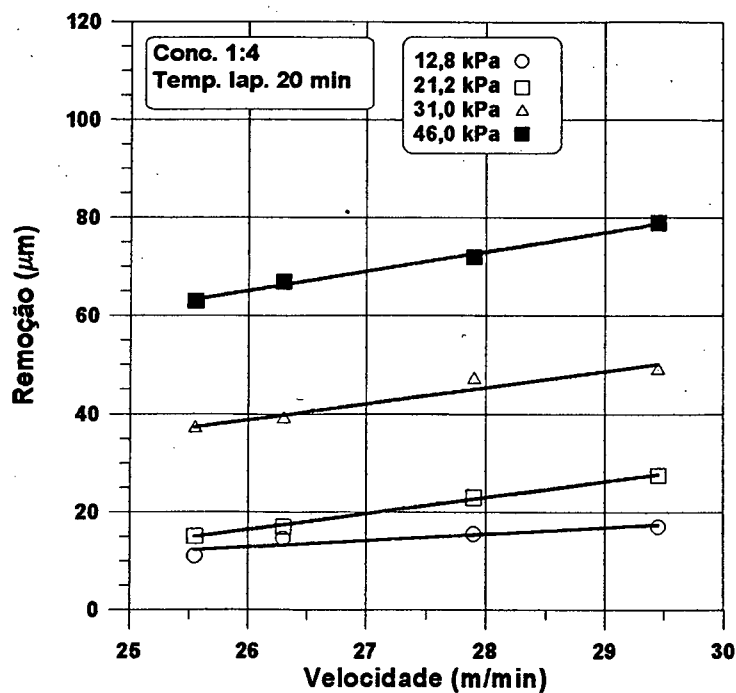


Figura - 7.6: Remoção em função da velocidade média.

### 7.1.3 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO

Na análise da influencia da concentração, a remoção máxima é obtida para a relação 1:3. A figura 7.7 mostra o gráfico da remoção em função da concentração para os tempos de lapidação de 10 e 20 min.

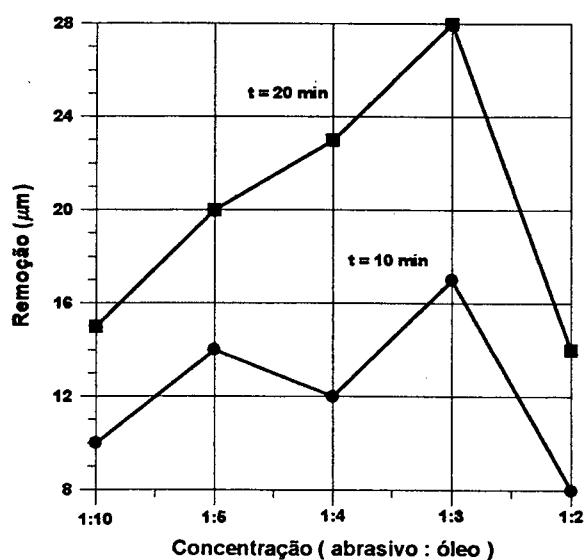


Figura - 7.7: Remoção em função da concentração.

Nos ensaios de rugosidade em função da concentração para diferentes tempos de lapidação, é realizada a análise da variância demonstrando que a concentração do abrasivo no meio de lapidação influe na rugosidade de forma significativa.

As figuras 7.8 e 7.9 mostram a média de Ra e Rz em função da concentração para os tempos de lapidação de 10 e 20 min. Com o aumento da concentração do abrasivo no meio de suspensão se tem a diminuição da rugosidade até a concentração 1:3, ocorrendo novamente o aumento para a concentração 1:2. Embora em alguns casos o processo de retificação obtivesse rugosidades Ra e Rz menores que na lapidação, as características superficiais não são as mesmas [32 ].

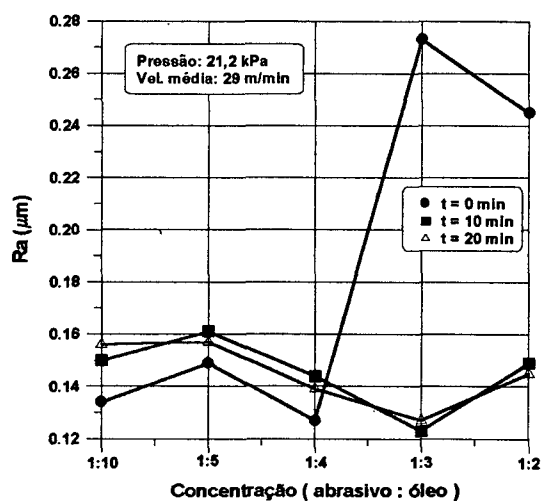


Figura 7.8: Ra em função da concentração.

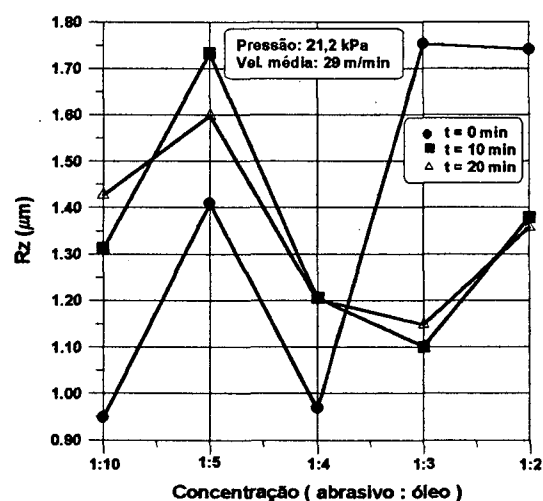


Figura - 7.9: Rz em função da concentração.

### 7.1.4 - INFLUÊNCIA DO MEIO DE SUSPENSÃO

Nos ensaios para a determinação da influência da pressão e da concentração sobre os resultados de trabalho, empregou-se diferentes meios de suspensão em cada ensaio. No primeiro foi utilizado o óleo mineral MA-5 com viscosidade de 0,0237 Pa.s, enquanto no segundo ensaio, empregou-se um óleo mineral com viscosidade de 0,0124 Pa.s. Através da análise da variância é constatado que com o fluido de maior viscosidade, alcança-se menor rugosidade, 0,138  $\mu\text{m}$  contra 0,158  $\mu\text{m}$ . Com relação a remoção, o fluido de menor viscosidade proporcionou uma remoção de 23  $\mu\text{m}$  contra 15  $\mu\text{m}$  para um tempo total de lapidação de 20 min.

### 7.1.5 - INFLUÊNCIA DA PRESSÃO

Com relação à remoção, a figura 7.10 mostra que o aumento da pressão leva ao aumento da remoção de material para os tempos de lapidação de 10 e 20 min.

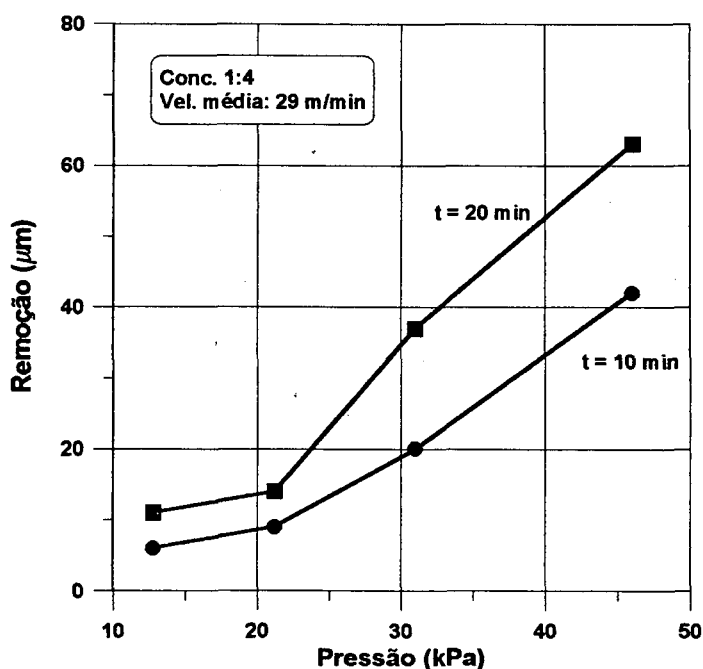


Figura - 7.10: Remoção em função da pressão.

No estudo da influência da pressão sobre a rugosidade, foi utilizada a análise da variância para a determinação da influencia da pressão e do tempo de lapidação sobre a rugosidade, Anexo B . Foi verificado que a pressão influe de maneira significativa na rugosidade, para estas condições de ensaios.

A figura 7.11 mostra o comportamento da rugosidade Ra em função da pressão, onde há a tendência da diminuição da rugosidade para a pressão 31,0 kPa, aumentando logo em seguida.

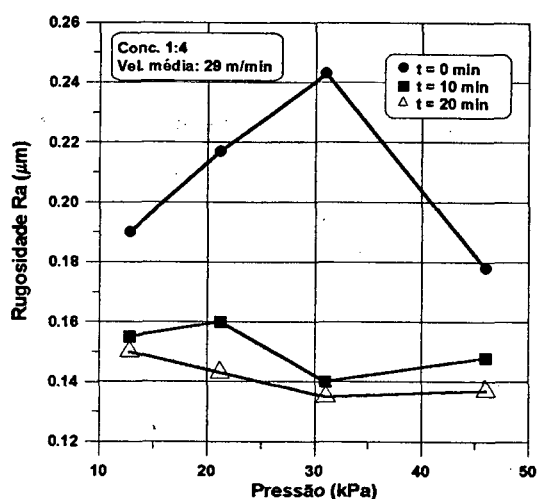


Figura - 7.11: Ra em função da pressão.

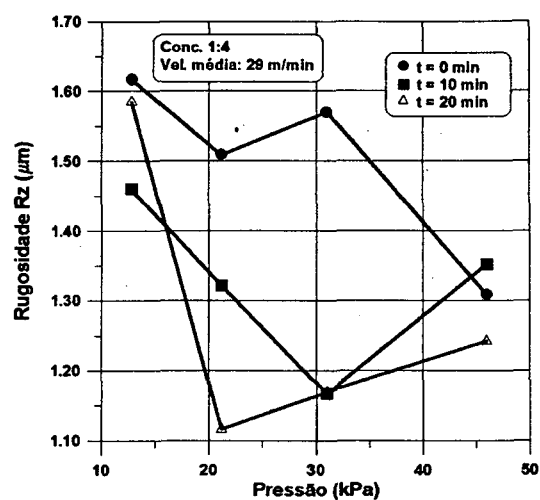


Figura - 7.12: Rz em função da pressão.

Com relação á rugosidade Rz, a análise de variância, mostra que a pressão e o tempo de lapidação influem de forma significativa. A figura 7.12 mostra que para 10 min a menor média de rugosidade foi obtida para 31,0 kPa de pressão, enquanto que para 20 min a menor média foi obtida para 21,1 kPa.

## 7.2 - INFLUÊNCIA SOBRE OS ERROS DE FORMA

### 7.2.1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO

Os resultados da influência do tempo sobre a planicidade, não mostraram uma tendência clara sobre como esta se desenvolve. Alguns resultados apresentaram uma diminuição do erro de planicidade, outros uma diminuição e depois um aumento e outros somente um aumento.

Com relação ao erro de paralelismo, para os ensaios da influência da pressão sobre os resultados de trabalho, o ângulo de inclinação do erro de paralelismo na direção y apresentou a tendência de crescimento com o aumento do tempo de lapidação. Com relação ao ângulo de inclinação na direção x, a sua evolução depende do perfil inicial da peça, e por isso não apresentou uma tendência clara. A figura 7.13 mostra o perfil inicial de um corpo de prova e a figura 7.14 mostra a remoção total em cada ponto da peça, para o ensaio de pressão de 21,2 kPa. Para esta condição é claro notar a remoção mais acentuada nos pontos mais distantes do centro da gaiola.

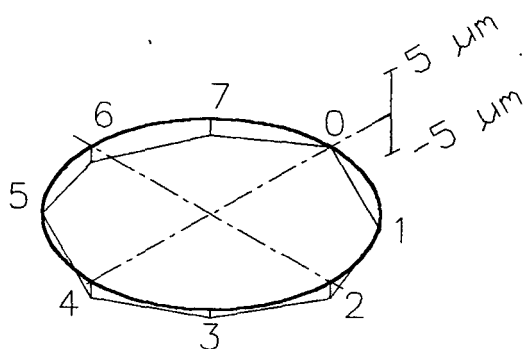


Figura - 7.13: Perfil inicial.

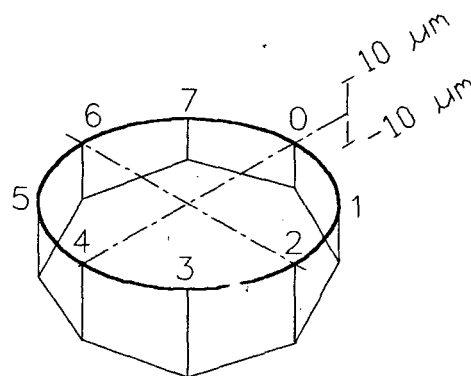


Figura - 7.14: Remoção total.

No anexo A é mostrado o perfil dos corpos de prova para o tempo inicial, após 10 e 20 minutos de lapidação, assim como a remoção total de cada ponto do corpo de prova.

### 7.2.3 - INFLUÊNCIA DA PRESSÃO

O gráfico 7.15 mostra o erro de planicidade em função da pressão para o tempo inicial e após 10 e 20 min. de lapidação. Pode-se notar que o aumento da pressão leva a diminuição do erro de planicidade. Entretanto esta tendência deve ser mais profundamente verificada através da realização de mais ensaios para cada condição, devendo os corpos de prova partir com a mesma faixa de erro de planicidade inicial.

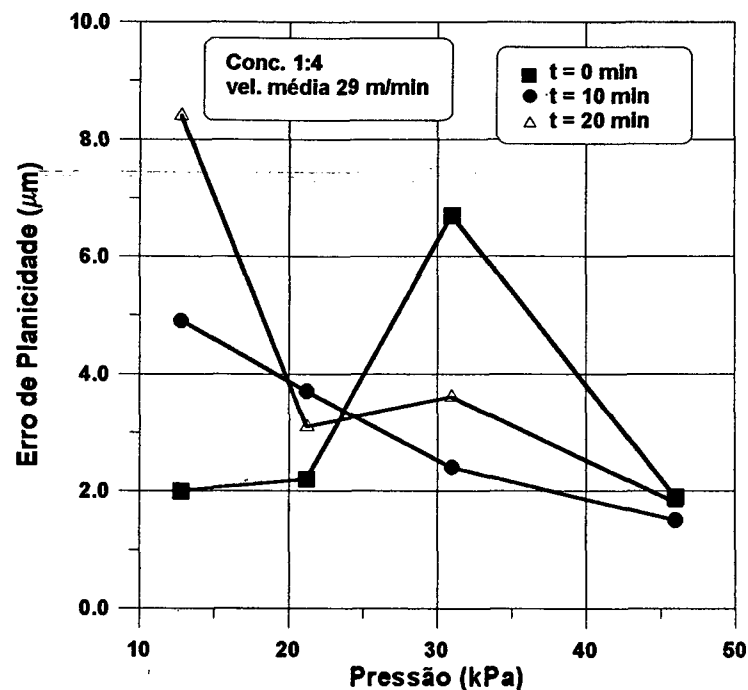


Figura - 7.15: Erro de planicidade em função da pressão.

Com relação ao erro de paralelismo, com o aumento da pressão há a tendência do aumento do ângulo de inclinação do plano ajustado segundo na direção x, entretanto sua evolução é fortemente influenciada pelo ângulo inicial, figura 7.16.

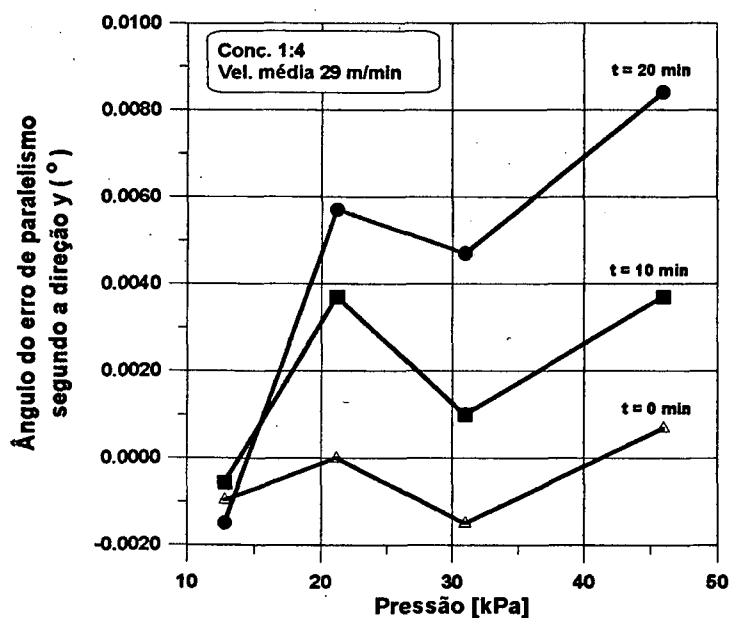


Figura - 7.16: Ângulo do erro de paralelismo segundo a direção y em função da pressão.

O ângulo do erro de paralelismo segundo a direção y também não apresentou um tendência clara, como mostra a figura 7.17.

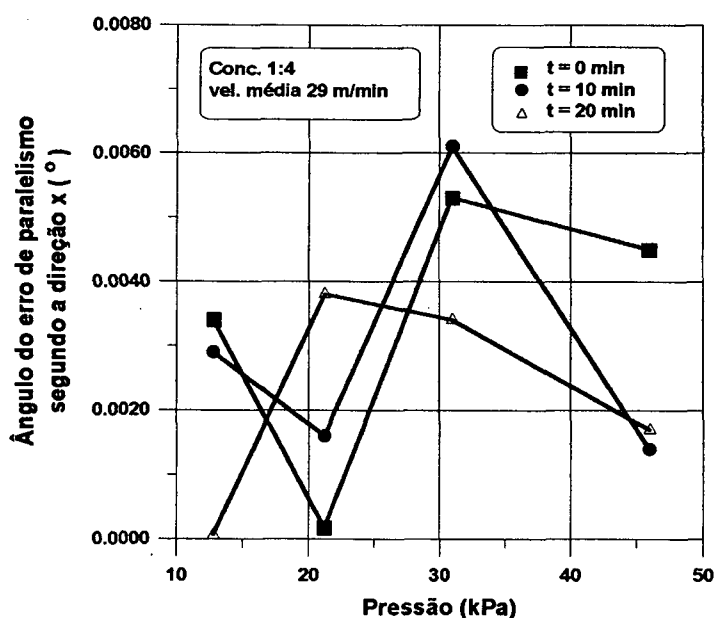


Figura 7.17: Ângulo do erro de planicidade segundo a direção x.

Acredita-se que os erros de paralelismo e planicidade são fortemente influenciados pelo modo como são aplicadas as cargas e pelo deslocamento das massas se sobre o corpo de prova, devido as vibrações da lapidadora durante os ensaios.

## CAPÍTULO 8

### EQUACIONAMENTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO DA REMOÇÃO

A simulação da remoção de uma peça é feita através do equacionamento da remoção de material obtida nos resultados experimentais, em função dos parâmetros de velocidade, pressão e tempo de lapidação. Uma vez que estes são os principais parâmetros tecnológicos que podem ser facilmente alterados durante o processo, para a obtenção de uma determinada remoção, rugosidade e erros de paralelismo e planicidade.

Outros parâmetros como tamanho de grão, tipo de abrasivo, meio de suspensão e concentração são previamente determinados em função de uma alta taxa de remoção e/ou de uma mínima rugosidade.

#### 8.1 - EQUACIONAMENTO DA REMOÇÃO

Para o equacionamento da remoção é empregado o modelo da análise dimensional com dois produtos adimensionais proposto por Enger, onde a equação da remoção é escrita como:

$$h_r = \frac{1}{\rho} \cdot C_1 \cdot C_2^{-m_s} \cdot (v_o + v) \cdot t \cdot p^{\frac{m_s}{2}} \cdot l^{\frac{2-m_s}{2}} \cdot Tg^{\frac{3-m_s}{2}} \quad (45)$$

Os coeficientes  $C_1$  e  $m_s$  são obtidos através da relação entre os produtos adimensionais:

$$\Pi_1 = \frac{h \cdot \rho \cdot Tg}{(v_o + v) \cdot t \cdot l} \quad (46)$$

$$\Pi_2 = C_2 \cdot \sqrt{\frac{l}{p \cdot Tg^3}} \quad (47)$$

Utilizando-se os resultados de remoção obtidos nos ensaios para 10 e 20 minutos de lapidação e empregando como quantidade de meio de lapidação  $2 \text{ mg/cm}^2$ , considerando-se  $C_2$



igual a 1, calcula-se os produtos adimensionais  $\Pi_1$  e  $\Pi_2$ . A figura 8.1 mostra o gráfico destes produtos.

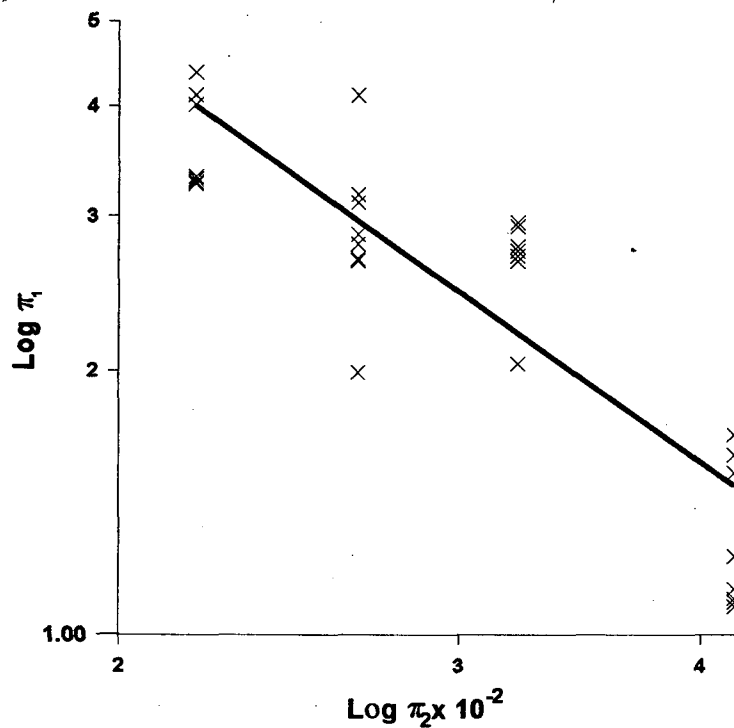


Figura - 8.1: Gráfico do produto adimensionais  $\Pi_1$  em função de  $\Pi_2$ .

Através deste gráfico, se obtém a relação entre  $\Pi_1$  e  $\Pi_2$  pelo cálculo dos coeficientes  $C_1$  e  $m_s$  da reta ajustada, respectivamente 0,009684 e 1,57579.

Segundo Enger,  $v_o$  na equação 45, é uma função do material lapidado. Entretanto tal fato não ocorreu, e é verificado uma relação entre  $v_o$  e a pressão de lapidação. A figura 8.2 mostra a dependência de  $v_o$  em função da pressão.

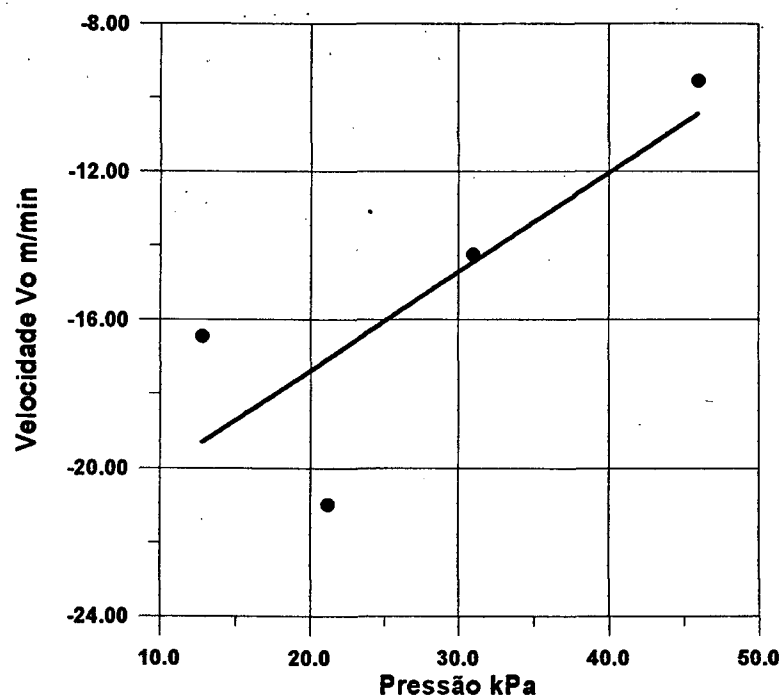


Figura - 8.2: Velocidade vo em função da pressão.

Através do ajuste de uma reta obtém-se a equação 53:

$$v_0 = 0,2671 * p - 22,73 \quad (48)$$

E com isso os coeficientes  $C_3=0,267137$  e  $C_4 = -22,7255$ . Substituindo os valores de  $C_3$  e  $m_5$  e a equação 48 na equação 45, se obtém a equação da remoção em função dos parâmetros tecnológicos  $v$ ,  $t$ ,  $p$ ,  $Tg$  e  $l$  e com isso a equação se torna:

$$h_r = \frac{1}{\rho} \cdot C_2 \cdot C_1^{-m_5} \cdot (C_3 * P + C_4 + v) \cdot t \cdot p^{\frac{m_5}{2}} \cdot Tg^{\frac{3 \cdot m_5 - 2}{2}} \cdot l^{\frac{2 - m_5}{2}} \quad (49)$$

Comparando-se os valores calculados pela equação 49 com os valores experimentais para as mesmas condições, conforme mostra a figura 8.3, observa-se uma discordância dos resultados.

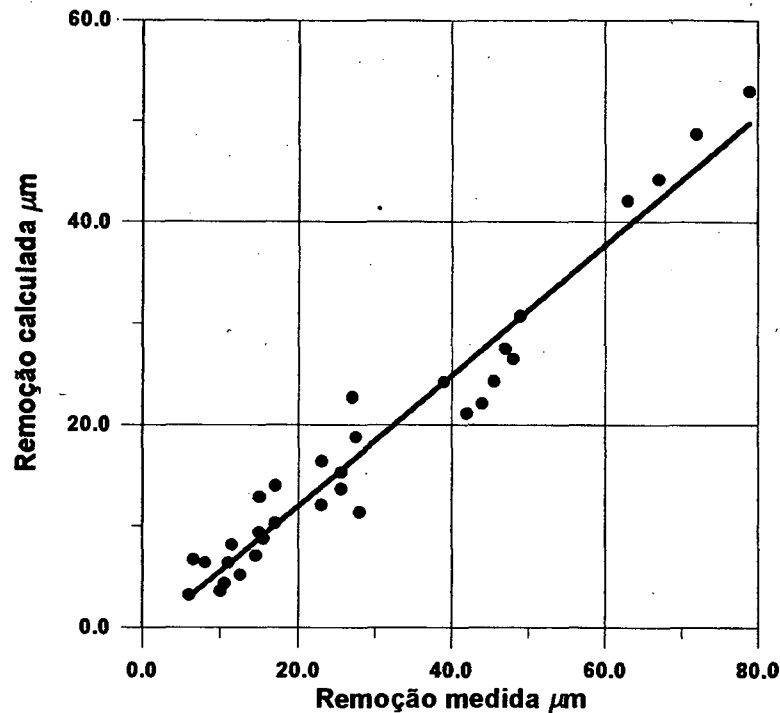


Figura - 8.3: Comparação da remoção calculada e medida experimentalmente.

Entretanto ajustando-se uma reta a estes pontos, verifica-se o comportamento linear. Com isto, calcula-se dois novos coeficientes para o ajuste da equação:  $C_5 = 1,557$  e  $C_6 = 1,243$ , obtendo-se a relação final entre a remoção calculada e a experimental, equação 50.

$$h_r = \left( \frac{1}{\rho} \cdot C_2 \cdot C_1^{-m_5} \cdot (C_3 \cdot p + C_4 + v) \cdot t \cdot p^{\frac{m_5}{2}} \cdot Tg^{\frac{3 \cdot m_5 - 2}{2}} \cdot l^{\frac{2 - m_5}{2}} \right) \cdot C_5 + C_6 \quad (50)$$

Analisando o erro obtido com o equacionamento dos resultados experimentais obtidos, é visto que o maior erro relativo está em torno de 80%, figura 8.4. Entretanto grande parte está abaixo de 20%.

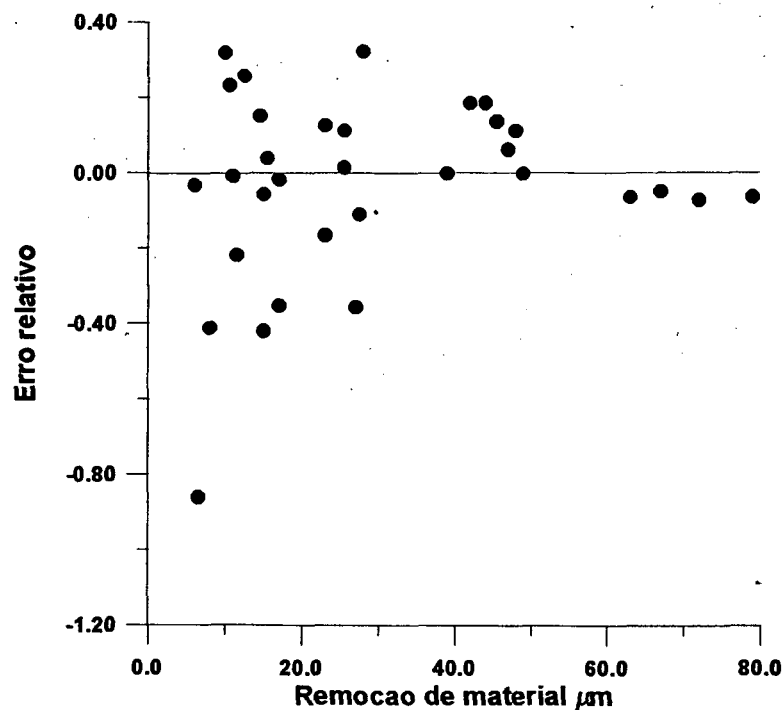


Figura - 8.4: Erro relativo em função da remoção de material.

Simulando a remoção de uma peça, conforme mostra a figura 8.6, e as condições de lapidação conforme mostra as figuras 8.5 e 8.7.

*Simulador do Processo de lapidação*

Definições

Trajectoria

Velocidade

Desgaste

Saida

Definição dos dados da lapidação

|   |         |
|---|---------|
| Raio do disco de lapidação (mm)             | : 182.5 |
| Raio da gaiola (mm)                         | : 81    |
| Velocidade do disco de lapidação (rpm)      | : 38    |
| Velocidade da engrenagem interna (rpm)      | : 29    |
| Distância centro disco - centro gaiola (mm) | : 115   |
| Distância centro gaiola - ponto pega (mm)   | : 11.8  |
| Nº de dentes engrenagem interna             | : 6     |
| Nº de dentes engrenagem da gaiola           | : 23    |
| Nº de dentes engrenagem externa             | : 22    |

Ler

Gravar

Sair

Figura - 8.5: Parâmetros cinemáticos.

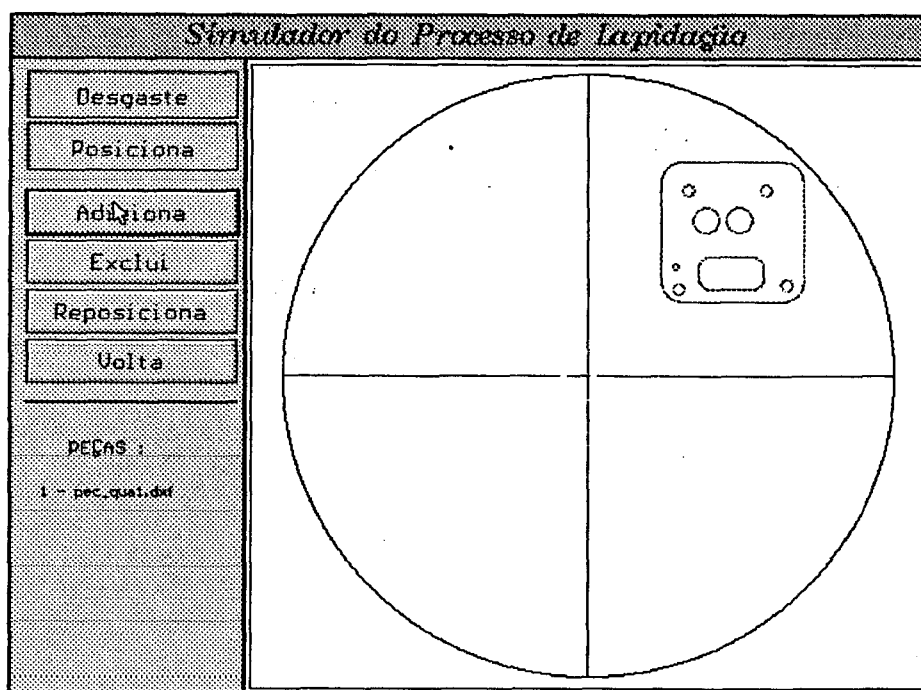


Figura - 8.6 : Posicionamento da peça.

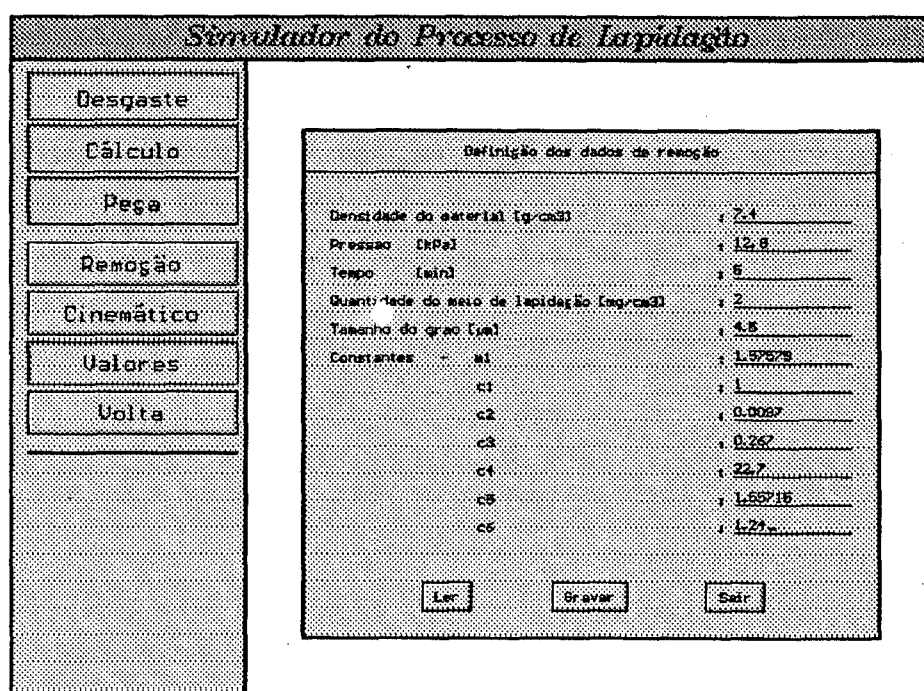


Figura - 8.7: Parâmetros de remoção.

A figura 8.8 mostra o resultado da simulação da remoção da peça. Neste gráfico pode-se estimar além da sobremedida de material removido, os erros de planicidade e paralelismo devido a fatores cinemáticos. O erro de planicidade é definido como a distância entre os planos 1 e 2, como pode ser visto na figura. O erro de paralelismo é indicado pelo ângulo segundo à direção y, na figura este é o ângulo entre o plano 1 e o eixo da abscissa.

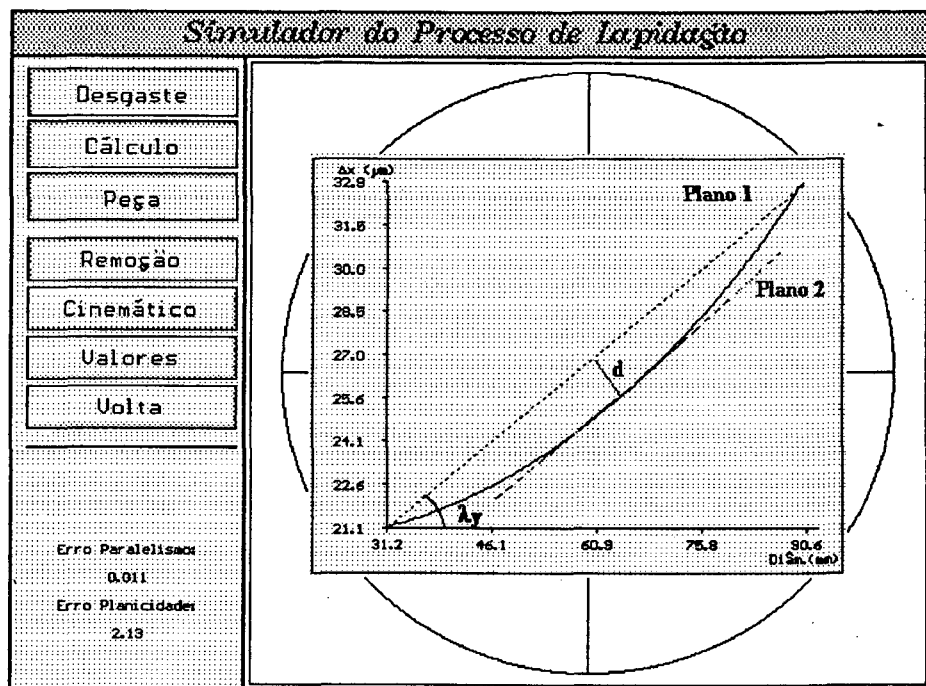


Figura - 8.8: Gráfico da remoção da peça.

A figura 8.9 mostra o gráfico da densidade de trajetória. Comparando este com o gráfico da remoção da peça, nota-se uma semelhança na forma de remoção de material, de modo que o gráfico de densidade de trajetória é uma boa ferramenta quando não se dispõe do equacionamento da remoção para um dado material.

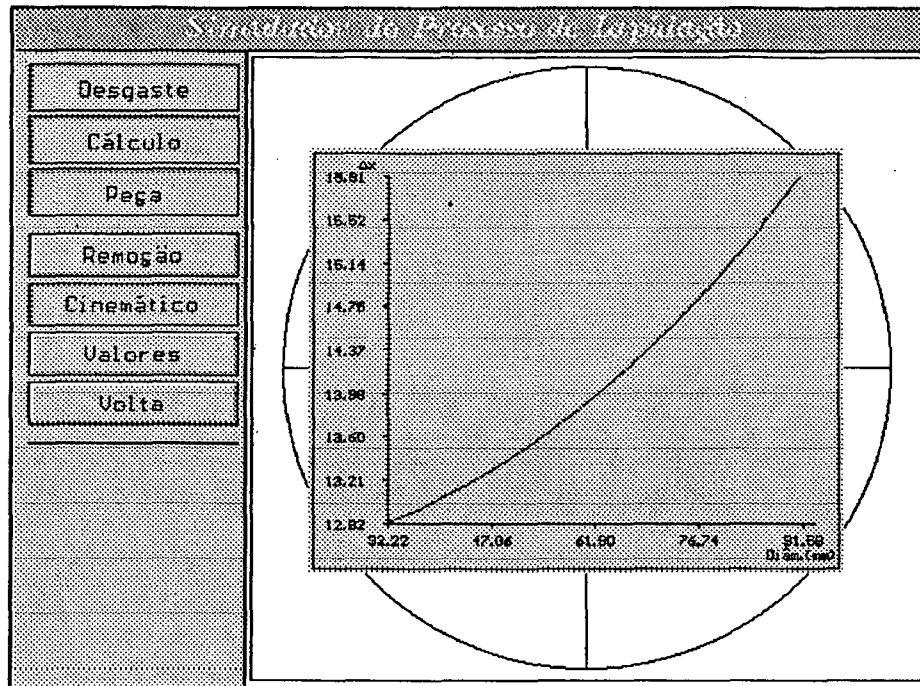


Figura - 8.9: Gráfico da densidade de trajetória.

## **CAPÍTULO 9**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS**

O conhecimento dos parâmetros de usinagem no processo de lapidação plana, permite um planejamento eficaz do processo bem como sua otimização com diminuição dos custos de fabricação.

A seleção dos parâmetros de usinagem está associada ao compromisso da escolha dos fatores que são mais importantes na fabricação de uma determinada peça para, a obtenção de uma alta qualidade superficial, baixos erros de planicidade e paralelismo. Os fatores mais influentes são relacionados às grandezas específicas do meio de lapidação, às grandezas específicas do processo e aos fatores relacionados à cinemática.

Com a simulação numérica do processo, pode-se analisar o comportamento do desgaste do disco e das peças usinadas em função dos diversos parâmetros empregados na lapidação. Foi visto que, os fatores relacionados à geometria, tamanho, posicionamento e quantidade de peças na gaiola influem na característica do perfil de desgaste do disco de lapidação. As componentes das velocidades da engrenagem interna e do disco são os parâmetros mais facilmente controláveis durante o processo, para a obtenção do perfil de desgaste desejável do disco. Com relação ao desgaste da peça, fatores como sua geometria, tamanho, posicionamento, componentes de velocidades da engrenagem interna e do disco de lapidação e o tempo do processo influem na obtenção do perfil final da peça.

Com isso, pode-se concluir que para a minimização do tempo do processo e dos erros de planicidade e paralelismo das peças lapidadas, deve-se escolher o melhor posicionamento das peças na gaiola e valores ótimos de velocidade. Entretanto, as componentes de velocidade que levam ao desgaste homogêneo do disco de lapidação podem provocar o aumento do tempo do processo para uma certa sobremedida de material da peça. Por isso é interessante que sejam



escolhidos valores que durante parte do processo, leve a um desgaste mais acentuado da periferia do disco e no restante do tempo ocorra um desgaste mais acentuado no centro do disco de lapidação. De modo que no final do processo, a soma dos dois perfis gerados tenda a um perfil de desgaste mais uniforme, apresentando os menores erros de planicidade e paralelismo possíveis.

O procedimento experimental efetuado visou uma análise qualitativa, buscando mostrar a tendência da influência de parâmetros sobre os resultados do processo. Foi visto que o aumento do tempo de lapidação leva ao aumento da remoção. Com relação à rugosidade  $R_a$ , esta cai rapidamente abaixo de um determinado patamar, nos minutos iniciais do processo, independente da pressão e da rugosidade inicial. Entretanto para a rugosidade  $R_z$  observou-se uma flutuação grande dos resultados, ocorrendo somente para a pressão de 31,0 kPa uma queda rápida e a estabilização.

Na análise da influência do comprimento de trajetória e da velocidade média de um ponto da peça, foi visto que a rugosidade não é influenciada por estes fatores. Entretanto o aumento da velocidade média de pontos da peça leva ao aumento da remoção de material.

As menores rugosidades  $R_a$  e  $R_z$  e a maior remoção, no estudo da influência da concentração, foram obtidos para a relação 1:3. Com relação ao meio de suspensão, o fluido de menor viscosidade proporcionou uma remoção maior, enquanto que o de maior viscosidade a menor rugosidade. O aumento da pressão de lapidação levou ao aumento da remoção, entretanto a rugosidade mínima foi obtida para a pressão de 31,0 kPa.

Com relação aos erros de forma, é verificado a influência do tempo e da pressão de lapidação. O tempo de lapidação não mostrou uma tendência clara com relação à planicidade. Entretanto é observado o aumento do ângulo do erro de paralelismo segundo a direção y, com o aumento do tempo de lapidação. Com o aumento da pressão de lapidação é observado a diminuição do erro de planicidade e o aumento do ângulo do erro de paralelismo segundo a direção y, sendo este fortemente influenciado pelo ângulo inicial.

O equacionamento e a simulação da remoção, em função dos principais parâmetros tecnológicos, apresenta-se como uma importante ferramenta no auxílio da determinação dos valores ótimos dos parâmetros de lapidação durante os ciclo de desbaste, pré-

acabamento e acabamento, em função de um dado sobremetal, erros de paralelismo e planicidade.

Os resultados obtidos através da verificação experimental, mostram a tendência do processo. Contudo é necessário a execução de ensaios mais refinados, já que estes foram executados para testar a operacionalidade do sistema, objetivo principal da realização deste trabalho.

Para a continuação de trabalhos sobre o processo de lapidação, sugere-se:

- Ensaios quantitativos e qualitativos envolvendo mais fatores do processo;
- Equacionamento da remoção e rugosidade para outros materiais;
- Determinação experimental do desgaste do disco de lapidação para a comprovação com o modelo teórico desenvolvido;
- Determinação da influência da espessura da fenda de trabalho sobre a remoção de material;
- Simulação da remoção do processo de lapidação esférica;
- Determinação da influência de outros fatores no erro de planicidade e paralelismo das peças.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren: schleifen, honen, läppen.** 3. Aufl. Düsseldorf VDI, V2.
- [2] SPUR, Günter, SABORKA, Jongo. **Mecanismo de remoção de material no polimento de cerâmica.** Máquinas e Metais, p. 32 - 42, fev. 1991.
- [3] STAHLI, A. W.: **The Technique of Lapping.** A.W. Stahli Ltd., CH - 2542 Pieterlen/Bienne, Switzerland. 35 pg.
- [4] SPUR, G., STOEFERLE, TH. **Handbuch der Fertigungstechnikspanen.** München: Carl Hanser, 1980. v.3, t1, 641p.
- [5] N.N., catálogo No. 6/1986, **Polishing and Lapping of sealing surfaces in one operation only,** Joisten and Kettenbaum.
- [6] N.N., **Lapping Machines,** Lappatrici Melchiorre, catálogo.
- [7] N.N., **Läpp-Maschinen,** Stähli, catálogo.
- [8] FISCHER, E.; **Bewegungszyklen und Richtungsfelder beim Planläppen.** Werkstatt und Betrieb 99, 1966, 4, S. 237 - 243.
- [9] FELD, Mieczyslaw, BARYLSKI, Adam. **Läppen ebener Flächen mit Zweimetall - Scheiben.** Werkstatt und Betrieb, v.123, n.12, p.933 - 935, 1990.
- [10] SALJÉ, E., PAULMANN, R., **Relations between abrasive processes.** Annals of the CIRP, v.37, p. 641 - 648, 1988.
- [11] GRUNWALD, F., SCHILLING, G. **Werkstoffabtrag und Rauheit beim Planlappen metallischer Werkstoffe.** Feingeratetechnik. 28Jg. Heft 8/1979, p. 345 - 348
- [12] CHANDRASEKAR, S., SHAW, M. C., BHUSHAN, B. **Comparison of Grinding and Lapping of Ferrites and Metals.** ASME Journal of Engineering for Industry, v.109, n.4, may 1987, p. 76 - 82
- [13] SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEER **Tool and manufacturing engineers handbook - materials, finish and coating.** 4 ed. Dearborn: One SME Drive 1983 V.3 paginação irregular.

- [14] GRÄVEN, Klaus - Jürgen. **Planparallel - und Aussen - Rundläppen.** Werkstatt und Betrieb, v.115,n.6,p.373-376,1982.
- ✕ [15] KASAI, Toshio, HORIO, Kenichiro, KARAKI-DOY, Toshiro, et al. **Improvement of Conventional Polishing Conditions for Obtaining Super Smooth Surfaces of Glass and Metal Works.** Annals of the CIRP, v.39, p.321 - 324, jan. 1990.
- [16] DAVIS, C. E. **Untersuchung der Einflussgrößen beim Flachläppen mit Diamont - Mikrokörnungen.** Düsseldorf: De Beers Industrie. Diamanten, 1973. 16p.
- [17] HAASIS, Gerhard. **Inhaltsverzeichnis,** [s.l.:s.n, fev 1975]. paginação irregular
- [18] BODRICH, K.; ENGER, U.: **Einflüsse auf die Formgenauigkeit beim Lappen ebener Werkstücke.** XIV. Internat. Wiss. Koll. TH Ilmenau 1969. S. 13 - 24.
- [19] HANSCH, H. : **Ein Beitrag zur Beherrschung des Lapp-Prozesses am Beispiel des Planlappens metallischer Werkstücke.** Diss. TH Ilmenau, 1981.
- [20] ORLOV, P. N.: **Modellierung des Schleifalappens von Werkstücken.** Wiss. Z. Techn. Hochsch. Magdeburg 29, 1985, Heft 8. S. 35 - 37.
- [21] ENGER, U.: **Mathematische Bestimmung des Abtrages beim Lappen unter Verwendung der Dimensionsanalyse.** Wiss. Z. TH Ilmenau 16, 1970, H.5, s.107 - 111.
- [22] STÄHLI, A. W., KLING, J.: **Zweischeibenläppen.** Werkstatt und Betrieb, v.121, n.9, p. 746 - 752, 1988.
- [23] SPUR, G.; SIMPFENDORFER, D.: **Numerische Vorherbestimmung des Werkzeugverschleißes beim Planläppen.** VDI-Z. Bd.128, 1986, Nr. 3, pg 76 -82.
- [24] American Society for Metals: **METALS HANDBOOK- Machining,** v.16, 9th ed. - Metals Park , 1978, p.298 - 310.
- [25] ERMAKOVA, I. N., SAVELOVA, A. A.: **Calculating the operating conditions of flat lapping machines with planetary motion.** Machines & Tooling, v.48, n.4, p. 11 - 14.
- [26] SHIGLEY, J. E.: **Mechanical Engineering Design, First Metric Edition,** Mc Graw Hill, 1986, p 486 - 489.

[27] SPUR, G.; SIMPFENDORFER, D.: **Simulation der Kinematik des Plan(parallel)läppens.**

ZwF 80, 1985, 7, S. 318 -324

[28] SPUR, G., SIMPFENDÖRFER, D. **Modell der Kinematik des Planläppens.** In: SALJÉ, E.

Schleifen, Honen, Läppen und Polieren: Verfahren und Maschinen. 54.Aus.

Essen: Vulkan,1987. p.344 - 361

[29] Lerm, Y.: **Simulação computacional da cinemática da lapidação plana, do desgaste do disco**

**de lapidação e das peças lapidadas.** Relatório interno, Florianópolis: UFSC, 1993.

[30] HUANG, S.T.; FAN, K.C.; WU, J.H.: **A New Minimum Zone method for evaluating**

**flatness erros.** Jounal of tha American Society for Precision Engineering, vol. 15, n 1,

January 1993, pg. 25-32.

[31] SCHNEIDER, C.A.; SCHOELER N.; VEIGA, C.L.N., **Apostila de Ensaio Geométricos de**

**Máquinas Ferramentas.** Junho de 1987. LABMETRO - UFSC.

[32] WEINGAERTNER, W.L.; CRICHIGNO, J.M.F. et al. **Fundamentos da Usinagem com**

**Ferramenta de Geometria não Definida: 1º Relatório de Ensaio - Influência da**

**Concentração e da Pressão sobre a Qualidade Superficial e a Remoção na**

**Lapidação,** convênio EMBRACO - UFSC. Florianópolis - S.C., 1993. 58 P.

✂ [33] TONSHOFF, H. K, SCMIEDEN, W., INASKI, I, et al. **Abrasive machine of silicon.** Annals

of the CIRP, v.39, p. 621 - 635, fev.1990.

[34] MESQUITA, N.G.M. **Avaliação e Escolha de uma Superfície Segundo sua Função e**

**Fabricação .** Florianópolis, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, abril

1992. 142 f ( Tese de Doutorado ).

[35] WITTSTOCK, Gehard. **Automatisches Läppen, Honen und Polieren.** Werkstatt und Betrieb,

v.118, n.9, p. 623 - 625, 1985.

[36] MOTGOMERY; D.C. **Design and Analyse of Experiments.** Third Edition. John Wiley and

Sons. 1991. Paginação irregular.

## APÊNDICE A

### PERFIL DO CORPO DE PROVA EM FUNÇÃO DO TEMPO E PERFIL DE REMOÇÃO TOTAL.

- Em função da pressão de lapidação:

- Pressão de 12,8 kPa

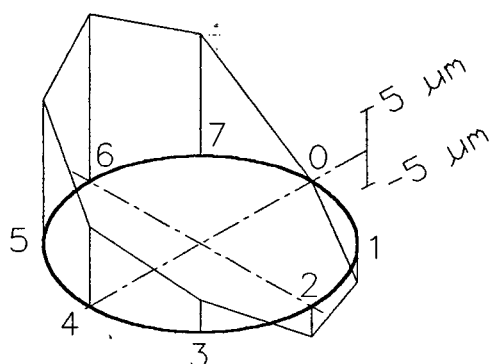


Figura - 1 : Perfil inicial.

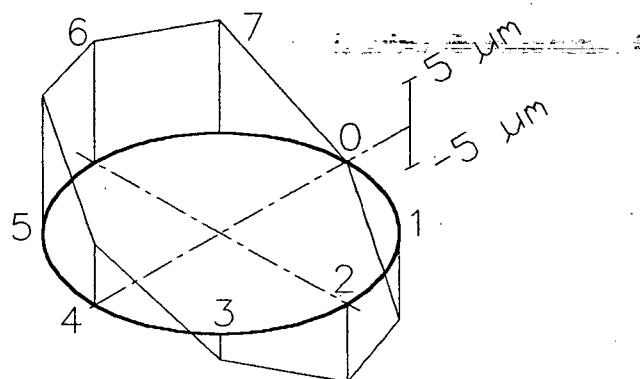


Figura - 2: Perfil após 10 min. de lapidação.

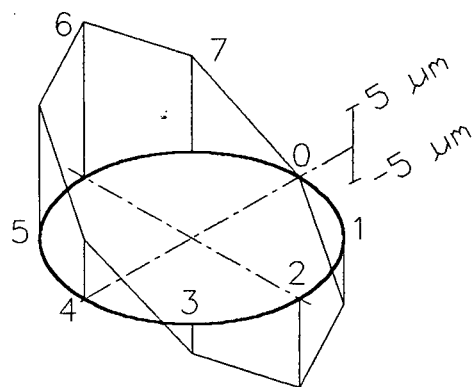


Figura - 3: Perfil após 20 min. de lapidação.

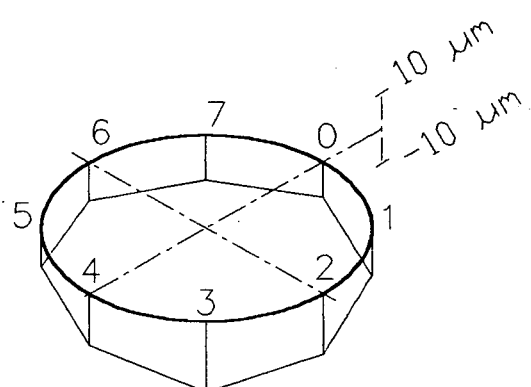


Figura - 4: Perfil total de remoção.

- Pressão: 21,2 kPa

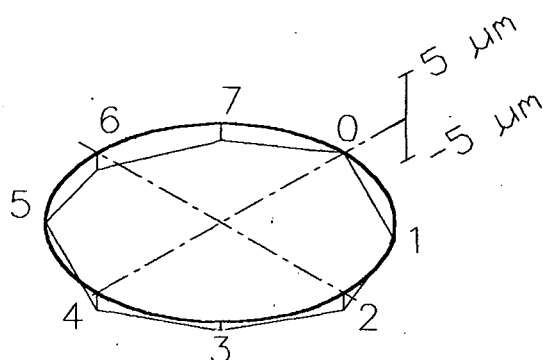


Figura - 5 : Perfil inicial.

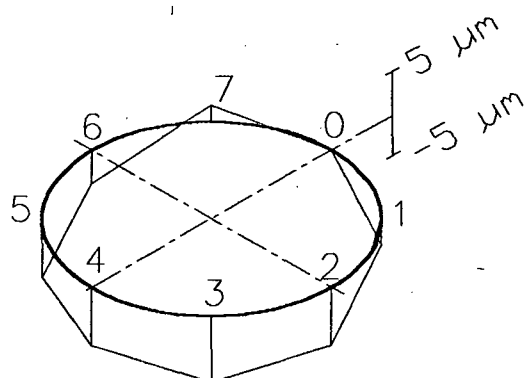


Figura - 6: Perfil após 10 min. de lapidação.

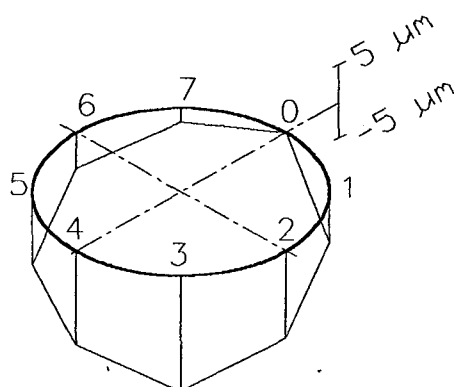


Figura - 7: Perfil após 20 min. de lapidação.

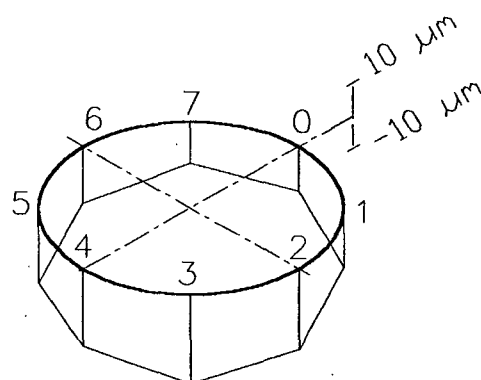


Figura - 8: Perfil total de remoção.

- Pressão 31,0 kPa

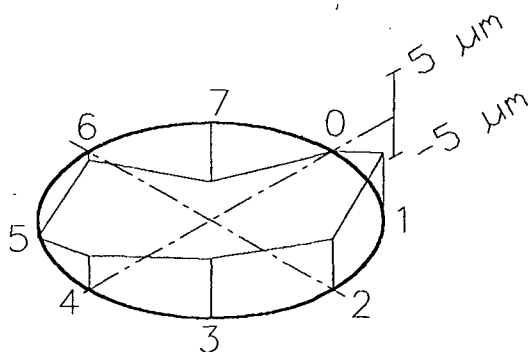


Figura - 10 : Perfil inicial.

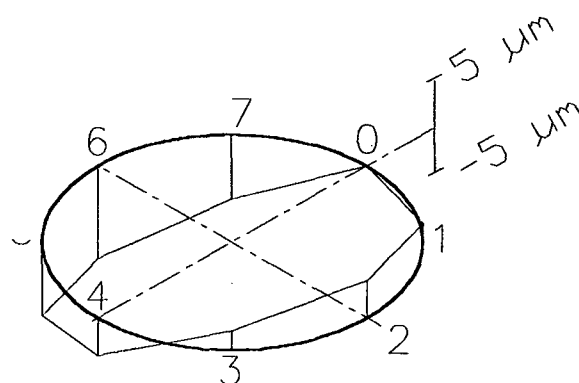


Figura - 11: Perfil após 10 min. de lapidação.

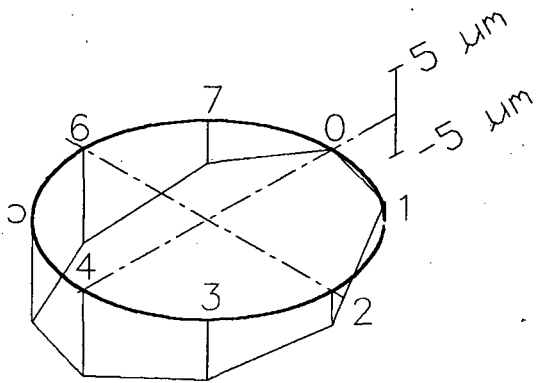


Figura - 12: Perfil após 20 min. de lapidação.

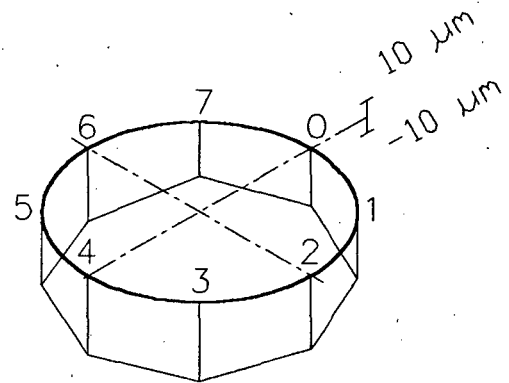


Figura - 13: Perfil total de remoção.

- Pressão: 46,0 kPa

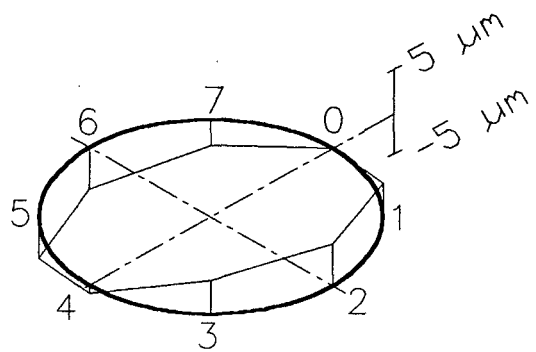


Figura - 14 : Perfil inicial.

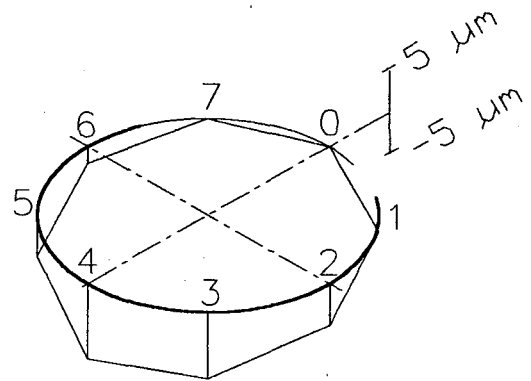


Figura - 15: Perfil após 10 min. de lapidação.

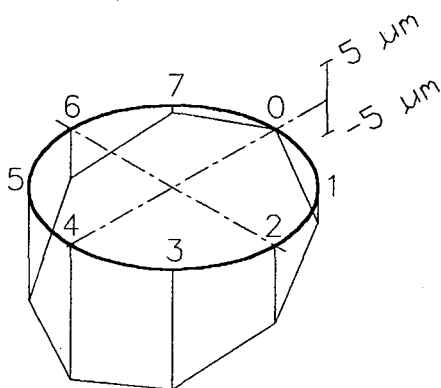


Figura - 16: Perfil após 20 min. de lapidação.

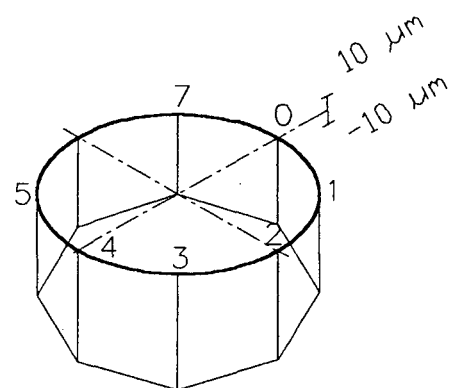


Figura - 17: Perfil total de remoção.



## ANEXO B

## ESTUDO DA RUGOSIDADE ATRAVÉS DA ANÁLISE DA VARIÂNCIA

Para determinar a influência de fatores sobre a rugosidade é empregada a análise da variância. Esta é uma ferramenta muito útil para tomar uma decisão se um determinado fator influe no resultado, sem que seja necessário o julgamento subjetivo de quem está fazendo a análise. Este método será empregado para analisar a influência da pressão e tempo, concentração e tempo, posição de medição e tempo; meio de suspensão e tempo sobre as rugosidades Ra e Rz.

O modelo utilizado para esta análise é:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + e_{ijk} \quad \left\{ \begin{array}{l} i=1,2,\dots,a; \\ j=1,2,\dots,b; \\ k=1,2,\dots,n \end{array} \right. \quad (51)$$

$y_{ijk}$  - resposta correspondente a k - ésima unidade que recebe o tratamento consistente na combinação do nível i de A com o nível j de B;

$\mu$  - média geral, independente de qualquer tratamento;

$\tau_i$  - efeito do nível i de A;

$\beta_j$  - efeito do nível j de B;

$(\tau\beta)_{ij}$  - efeito da combinação do nível i de A com o nível j de B;

$e_{ijk}$  - erro aleatório.

Com relação aos parâmetros  $\tau_i$  e  $\beta_j$ , se os tratamentos são fixados previamente pelo experimentador, os resultados obtidos são válidos apenas para o conjunto de tratamentos usados e o modelo empregado é de efeitos fixos. Entretanto quando os tratamentos são uma amostra, aleatória, de uma população de tratamentos, emprega-se um modelo de efeitos aleatórios. Nesta análise é empregado o modelo de efeitos fixos, uma vez que os fatores foram fixados previamente [36].

No modelo de efeitos fixos, o efeito  $\tau_i$  e  $\beta_j$  são usualmente definidos como desvios da média global, de modo que

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \quad (52)$$

$$\sum_{j=1}^b \beta_j = 0 \quad (53)$$

Se a hipótese  $H_0$  for verdadeira, todos os tratamentos terão média  $\mu$  iguais. Então para o tratamento da coluna A:

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n = 0$$

$$H_1 : \text{pelo menos um } \tau_i \neq 0$$

Para o efeito do tratamento da coluna B:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0$$

$$H_1 : \text{pelos menos um } \beta_j \neq 0$$

Para o efeito dos tratamentos A e B:

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ para todo } i,j$$

$$H_1 : \text{pelo menos um } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

O procedimento para testar a igualdade das médias dos tratamentos, ou testar se os efeitos dos tratamentos são iguais a zero, é a análise da variância. A hipótese  $H_0$  é chamada de hipótese nula e  $H_1$  a hipótese alternativa. Para testar  $H_0$  é necessário fixar o valor da probabilidade de rejeitarmos esta hipótese quando ela for verdadeira. Este valor é denotado por  $\alpha$  e deve ser pequeno, uma vez que a rejeição da hipótese  $H_0$  quando ela for verdadeira é um erro, denominado de erro tipo I. Para  $\alpha$  fixado, determina-se na tabela referente à distribuição F o valor correspondente a  $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ . Se o valor de  $F_0$  encontrado experimentalmente for maior que  $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$   $H_0$  é rejeitada e os tratamentos apresentam diferenças significativas entre seus efeitos, sendo estes diferentes de zero.

Para dois fatores  $F_0$  é calculado como mostra a tabela 1.

Tabela 1: Análise de variância

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma de quadrados | Quadrado médio   | F <sub>0</sub>                    |
|-------------------|--------------------|-------------------|------------------|-----------------------------------|
| Tratamento A      | a-1                | SSA               | MS <sub>A</sub>  | MS <sub>A</sub> /MS <sub>e</sub>  |
| Tratamento B      | b-1                | SSB               | MS <sub>B</sub>  | MS <sub>B</sub> /MS <sub>e</sub>  |
| Interação         | (a-1).(b-1)        | SSAB              | MS <sub>BA</sub> | MS <sub>BA</sub> /MS <sub>e</sub> |
| Erro              | ab(n-1)            | SS <sub>e</sub>   | MS <sub>e</sub>  |                                   |
| Total             | abn-1              | SS <sub>T</sub>   |                  |                                   |

As somas quadradas são calculadas como:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (54)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (55)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (56)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (57)$$

$$SS_T = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (58)$$

### - Influência da posição de medição e do tempo.

A rugosidade é medida em 6 regiões do corpo de prova, conforme foi mostrado na verificação experimental. Cada posição está sujeita a uma característica de velocidade diferente e percorre diferentes comprimentos de trajetórias. Por isso é feita uma análise para se determinar se a posição de medição de rugosidade e o tempo de lapidação influem no resultado.

Para cada posição de medição e tempo de lapidação é feita somente uma medição de rugosidade e por isso será utilizado o método de uma observação para cada condição. O efeito da interação do tempo e posição  $(\tau\beta)_{ij}$  e o erro experimental não podem ser separados. Consequentemente assume-se que a interação para este caso  $(\tau\beta)_{ij} = 0$ . A tabela 2 mostra a rugosidade em função da posição e tempo de lapidação, empregando-se a condição de concentração de 1:4 e pressão de 12,8 kPa .

Tabela 2: Rugosidade Ra em função da posição e do tempo de lapidação.

| Tempo  | Pos. 1 | Pos. 2 | Pos. 3 | Pos. 4 | Pos. 5 | Pos. 6 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2 min  | 0.144  | 0.147  | 0.160  | 0.153  | 0.156  | 0.160  |
| 5 min  | 0.151  | 0.15   | 0.137  | 0.179  | 0.160  | 0.153  |
| 10 min | 0.134  | 0.132  | 0.140  | 0.158  | 0.146  | 0.154  |
| 15 min | 0.152  | 0.134  | 0.153  | 0.151  | 0.160  | 0.159  |
| 20 min | 0.169  | 0.137  | 0.143  | 0.146  | 0.156  | 0.149  |

Tabela - 3: Análise do tempo e da pressão sobre Ra

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos Quadrados | Quadrado médio | F <sub>0</sub> |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| Tempo             | 4                  | 0,000428           | 0,000107       | 0,744383       |
| Posição           | 5                  | 0,001095           | 0,000219       | 1,522720       |
| Erro              | 12                 | 0,001727           | 0,000143       |                |
| Total             | 29                 | 0,003251           |                |                |

Valores tabelados de  $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$  :

Para o tempo:  $F_{4,12,0.01} = 5,41$

Para a posição:  $F_{5,12,0.01} = 5,06$

Como  $F > F_0$  nenhum dos dois fatores influem de forma significativa na rugosidade Ra.

Analizando para a rugosidade Rz:

Tabela - 4: Rugosidade Rz em função do tempo e da posição

| Tempo   | Pos. 1 | Pos. 2 | Pos. 3 | Pos. 4 | Pos. 5 | Pos. 6 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2 min   | 1,528  | 1,372  | 1,584  | 1,508  | 1,633  | 1,675  |
| 5 min   | 1,529  | 1,707  | 1,311  | 1,986  | 1,779  | 1,672  |
| 10 min  | 1,374  | 1,159  | 1,350  | 1,604  | 1,538  | 1,752  |
| 15 min. | 1,594  | 1,441  | 1,498  | 1,703  | 1,791  | 1,822  |
| 20 min  | 2,259  | 1,305  | 1,424  | 1,609  | 1,474  | 1,438  |

Tabela - 5: Análise do tempo e da pressão sobre Rz

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos Quadrados | Quadrado médio | $F_0$    |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------|
| Tempo             | 4                  | 0,152925           | 0,038231       | 0,547790 |
| Posição           | 5                  | 0,418749           | 0,083749       | 1,199989 |
| Erro              | 12                 | 0,837505           | 0,069792       |          |
| Total             | 29                 | 1,409180           |                |          |

Valores tabelados de  $F_{\alpha/2, n1-1, n2-1}$  :

Para o tempo:  $F_{4,12,0.01} = 5,41$

Para a posição:  $F_{5,12,0.01} = 5,06$

Como  $F > F_0$  nenhum dos dois fatores influem de forma significativa na rugosidade Rz.

#### - Análise da influência do tempo e da pressão sobre a rugosidade

Uma vez que a posição não influe de forma significativa na rugosidade, então para cada conjunto de condição será considerado seis leituras de rugosidade. Logo neste caso é possível realizar a análise da interação pressão e tempo sobre os resultados de rugosidade. A tabela 6 mostra os resultados obtidos e a 7 a análise da variância.

Tabela - 6: Análise do tempo e da pressão sobre Ra

| Tempo | PRESSÃO |       |       |       |
|-------|---------|-------|-------|-------|
|       | 12,8    | 21,2  | 31,0  | 46,0  |
| 5     | 0,151   | 0,162 | 0,135 | 0,148 |
|       | 0,150   | 0,144 | 0,137 | 0,145 |
|       | 0,137   | 0,151 | 0,138 | 0,138 |
|       | 0,179   | 0,220 | 0,149 | 0,150 |
|       | 0,160   | 0,185 | 0,130 | 0,156 |
|       | 0,153   | 0,157 | 0,143 | 0,159 |
| 10    | 0,134   | 0,167 | 0,147 | 0,150 |
|       | 0,132   | 0,153 | 0,140 | 0,149 |
|       | 0,140   | 0,148 | 0,130 | 0,140 |
|       | 0,158   | 0,159 | 0,140 | 0,143 |
|       | 0,146   | 0,166 | 0,139 | 0,154 |
|       | 0,154   | 0,166 | 0,142 | 0,155 |
| 20    | 0,169   | 0,132 | 0,132 | 0,134 |
|       | 0,137   | 0,121 | 0,121 | 0,133 |
|       | 0,143   | 0,137 | 0,137 | 0,128 |
|       | 0,146   | 0,128 | 0,128 | 0,127 |
|       | 0,156   | 0,140 | 0,140 | 0,148 |
|       | 0,149   | 0,149 | 0,149 | 0,153 |

Tabela - 7: Análise do tempo e da pressão sobre Ra

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos Quadrados | Quadrado médio | F <sub>0</sub> |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| Tempo             | 2                  | 0,000673           | 0,000365       | 0,94           |
| Pressão           | 3                  | 0,005333           | 0,001777       | 4,59           |
| Interação         | 6                  | 0,003576           | 0,000596       | 1,54           |
| Erro              | 60                 | 0,023225           | 0,000387       |                |
| Total             | 71                 | 0,032809           |                |                |

Valores tabelados de  $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ :

Para o tempo:  $F_{2,60,0.01} = 4,98$

Para a pressão:  $F_{3,60,0.01} = 4,13$

Para a interação:  $F_{6,60,0.05} = 2,25$

Como  $F > F_0$  para o fator tempo e a interação, estes não influem de forma significativa, entretanto a pressão influe.

Para a rugosidade  $R_z$ :

Tabela - 8: Rugosidade  $R_z$  em função do tempo e da pressão de lapidação

| TEMPO | PRESSÃO |       |       |       |
|-------|---------|-------|-------|-------|
|       | 12,8    | 21,2  | 31,0  | 46,0  |
| 5     | 1,529   | 1,335 | 1,245 | 1,275 |
|       | 1,707   | 1,182 | 1,171 | 1,314 |
|       | 1,311   | 1,454 | 1,193 | 1,322 |
|       | 1,986   | 1,604 | 1,257 | 1,281 |
|       | 1,779   | 1,702 | 0,999 | 1,447 |
|       | 1,672   | 1,329 | 1,392 | 1,281 |
| 10    | 1,374   | 1,517 | 1,257 | 1,550 |
|       | 1,159   | 1,424 | 1,338 | 1,222 |
|       | 1,35    | 1,125 | 1,144 | 1,283 |
|       | 1,604   | 1,364 | 1,051 | 1,215 |
|       | 1,538   | 1,332 | 1,125 | 1,468 |
|       | 1,752   | 1,169 | 1,084 | 1,370 |
| 20    | 2,259   | 1,055 | 1,123 | 1,187 |
|       | 1,305   | 1,169 | 1,016 | 1,117 |
|       | 1,424   | 0,999 | 1,309 | 1,134 |
|       | 1,609   | 1,173 | 1,150 | 1,254 |
|       | 1,474   | 1,146 | 1,190 | 1,381 |
|       | 1,438   | 1,153 | 1,273 | 1,377 |

Tabela - 9: Análise do tempo e da pressão sobre  $R_z$

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos Quadrados | Quadrado médio | $F_0$  |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------|
| Tempo             | 2                  | 0,215              | 0,107          | 3,613  |
| Pressão           | 3                  | 1,453              | 0,484          | 16,285 |
| Interação         | 6                  | 0,271              | 0,045          | 1,517  |
| Erro              | 60                 | 1,784              | 0,030          |        |
| Total             | 71                 | 3,722              |                |        |

Valores tabelados de  $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ :

Para o tempo:  $F_{2,60,0.05} = 3,15$

Para a pressão:  $F_{3,60,0.01} = 4,13$

Para a interação:  $F_{6,60,0.05} = 2,25$

Como  $F_0 > F$  os fatores tempo e pressão influem de forma significativa na rugosidade  $R_z$ , entretanto a interação entre estes fatores não.

**- Influência do tempo e da concentração sobre a rugosidade.**

Para esta análise são empregadas somente 3 medições de rugosidade para cada condição, uma vez que foram perdidos alguns resultados.

A tabela 10 mostra  $R_a$  em função do tempo e da concentração do meio de lapidação.

**Tabela 10 - Rugosidade  $R_a$  em função do tempo e da concentração**

| TEMPO | CONCENTRAÇÃO |       |       |       |       |
|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|       | 1:2          | 1:3   | 1:4   | 1:5   | 1:10  |
| 5     | 0,153        | 0,140 | 0,145 | 0,169 | 0,165 |
|       | 0,137        | 0,136 | 0,138 | 0,151 | 0,149 |
|       | 0,142        | 0,123 | 0,141 | 0,146 | 0,163 |
| 10    | 0,152        | 0,140 | 0,143 | 0,168 | 0,163 |
|       | 0,153        | 0,124 | 0,140 | 0,148 | 0,129 |
|       | 0,148        | 0,116 | 0,140 | 0,152 | 0,156 |
| 20    | 0,146        | 0,130 | 0,155 | 0,166 | 0,167 |
|       | 0,136        | 0,122 | 0,136 | 0,152 | 0,135 |
|       | 0,148        | 0,116 | 0,132 | 0,159 | 0,166 |

**Tabela - 11: Análise do tempo e da concentração sobre  $R_a$ .**

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos Quadrados | Quadrado médio | $F_0$    |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------|
| Tempo             | 2                  | 0,000038           | 0,000019       | 0,181286 |
| Concentração      | 4                  | 0,005027           | 0,001256       | 11,81203 |
| Interação         | 8                  | 0,000402           | 0,000050       | 0,472901 |
| Erro              | 30                 | 0,003192           | 0,000106       |          |
| Total             | 44                 | 0,008660           |                |          |

Valores tabelados de  $F_{\alpha/2, n1-1, n2-1}$  :

Para o tempo:  $F_{2,30,0.01} = 5,39$

Para a concentração:  $F_{4,30,0.01} = 4,02$



Para a interação:  $F_{8,60,0.01} = 2,82$

Como  $F_0 < F$  para o fator tempo e a interação, estes não influem de forma significativa, entretanto a concentração influem na rugosidade  $R_a$ .

Para  $R_z$ , a tabela 12 mostra os resultados de medição e a 13 os resultados da análise.

Tabela 12: Rugosidade  $R_z$  em função do tempo e da concentração.

| TEMPO | CONCENTRAÇÃO |       |       |       |       |
|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|       | 1:2          | 1:3   | 1:4   | 1:5   | 1:10  |
| 5     | 1,537        | 1,241 | 1,276 | 1,894 | 1,478 |
|       | 1,254        | 1,241 | 1,578 | 1,465 | 1,611 |
|       | 1,376        | 1,343 | 1,155 | 1,732 | 1,366 |
| 10    | 1,249        | 1,147 | 1,255 | 1,918 | 1,405 |
|       | 1,610        | 0,975 | 1,116 | 1,567 | 1,192 |
|       | 1,340        | 1,138 | 1,276 | 1,780 | 1,339 |
| 20    | 1,423        | 1,128 | 1,350 | 1,641 | 1,312 |
|       | 1,273        | 0,894 | 1,099 | 1,874 | 1,385 |
|       | 1,362        | 1,481 | 1,243 | 1,548 | 1,585 |

Tabela 13: Análise do tempo e da concentração sobre a rugosidade  $R_z$ .

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos Quadrados | Quadrado médio | $F_0$    |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------|
| Tempo             | 2                  | 0,056064           | 0,028032       | 1,090887 |
| Concentração      | 4                  | 1,504294           | 0,376073       | 14,63519 |
| Interação         | 8                  | 0,0081621          | 0,010202       | 0,397046 |
| Erro              | 30                 | 0,770896           | 0,025696       |          |
| Total             | 44                 | 2,412876           |                |          |

Valores tabelados de  $F_{\alpha/2, n1-1, n2-1}$ :

Para o tempo:  $F_{2,30,0.01} = 5,39$

Para a concentração:  $F_{4,30,0.01} = 4,02$

Para a interação:  $F_{8,60,0.01} = 2,82$

Como  $F_0 < F$  para o fator tempo e a interação, estes não influem de forma significativa, entretanto a concentração influe.

### - Influência do meio de suspensão sobre a rugosidade

Para as condições de 21,2 kPa de pressão e concentração 1:4 foram realizados dois ensaios, cada um com um meio de suspensão diferente. A tabela 14 mostra o resultado da rugosidade  $R_a$  em função do meio de suspensão e do tempo de lapidação. A tabela 15 mostra a análise dos resultados.

Tabela - 14: Rugosidade  $R_a$  em função do meio de suspensão e do tempo

| MEIO   | TEMPO |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|
|        | 5     | 10    | 15    | 20    |
| Meio 1 | 0,162 | 0,167 | 0,154 | 0,153 |
|        | 0,144 | 0,153 | 0,154 | 0,142 |
|        | 0,151 | 0,148 | 0,152 | 0,128 |
|        | 0,220 | 0,159 | 0,181 | 0,134 |
|        | 0,185 | 0,166 | 0,164 | 0,146 |
|        | 0,157 | 0,166 | 0,158 | 0,155 |
| Meio 2 | 0,145 | 0,143 | 0,165 | 0,155 |
|        | 0,138 | 0,140 | 0,143 | 0,136 |
|        | 0,141 | 0,140 | 0,143 | 0,132 |
|        | 0,130 | 0,137 | 0,146 | 0,132 |
|        | 0,147 | 0,145 | 0,145 | 0,140 |
|        | 0,162 | 0,156 | 0,149 | 0,138 |

Tabela 15: Análise do tempo e do meio sobre  $R_a$

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos Quadrados | Quadrado médio | $F_0$    |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------|
| Meio              | 1                  | 0,004830           | 0,004830       | 12,60205 |
| Tempo             | 3                  | 0,001926           | 0,000642       | 1,675198 |
| Interação         | 3                  | 0,008223           | 0,002741       | 7,152216 |
| Erro              | 40                 | 0,01330            | 0,000383       |          |
| Total             | 47                 | 0,030310           |                |          |

Valores tabelados de  $F_{\alpha/2, n1-1, n2-1}$ :

Para o meio:  $F_{1,40,0.01} = 7,31$

Para o tempo:  $F_{3,40,0.05} = 2,84$

Para a interação  $F_{3,40,0.01} = 4,31$

Como  $F_0 > F$  para o fator meio de lapidação e a interação com o tempo, estes influem na rugosidade, entretanto o tempo não influe de forma significativa.

Para a análise da rugosidade  $R_z$ , a tabela 16 mostra os resultados em função dos fatores e a tabela 17 a análise

Tabela - 16: Rugosidade  $R_z$  em função do meio de suspensão e do tempo

| MEIO   | TEMPO |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|
|        | 5     | 10    | 15    | 20    |
| Meio 1 | 1.335 | 1.517 | 1.422 | 1.055 |
|        | 1.182 | 1.424 | 1.291 | 1.169 |
|        | 1.454 | 1.125 | 1.115 | 0.999 |
|        | 1.604 | 1.364 | 1.595 | 1.173 |
|        | 1.702 | 1.332 | 1.469 | 1.146 |
|        | 1.329 | 1.169 | 1.160 | 1.153 |
| Meio 2 | 1.276 | 1.255 | 1.495 | 1.350 |
|        | 1.509 | 1.175 | 1.176 | 1.242 |
|        | 1.578 | 1.116 | 1.446 | 1.099 |
|        | 1.054 | 1.059 | 1.619 | 1.064 |
|        | 1.289 | 1.459 | 1.488 | 1.460 |
|        | 1.469 | 1.355 | 1.379 | 1.213 |

Tabela 17: Análise do tempo e do meio sobre Ra

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma dos Quadrados | Quadrado médio | $F_0$    |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------|
| Meio              | 1                  | 0,004830           | 0,004830       | 12,60205 |
| Tempo             | 3                  | 0,001926           | 0,000642       | 1,675198 |
| Interação         | 3                  | 0,008223           | 0,002741       | 7,152216 |
| Erro              | 40                 | 0,01330            | 0,000383       |          |
| Total             | 47                 | 0,030310           |                |          |

Valores tabulados de  $F_{\alpha/2, n1-1, n2-1}$  :

Para o meio:  $F_{1,40,0.01} = 7,31$

Para o tempo:  $F_{3,40,0.05} = 2,84$

Para a interação:  $F_{3,40,0.01} = 4,31$

Como  $F_0 > F$  para o fator meio e sua interação com o tempo, estes influem, entretanto o tempo não influe de forma significativa.

## APÊNDICE C

### GRÁFICOS DA VELOCIDADE DE PONTOS DO CORPO DE PROVA

Cada conjunto de pontos do corpo de prova com mesma distância do centro da gaiola tem a mesma característica de velocidade. A medida em que se afasta do centro a curva de velocidade modifica, modificando também a velocidade média dos pontos. A seguir é mostrado os gráficos de velocidade dos pontos do corpo de prova onde são feitas as medições de remoção e rugosidade.

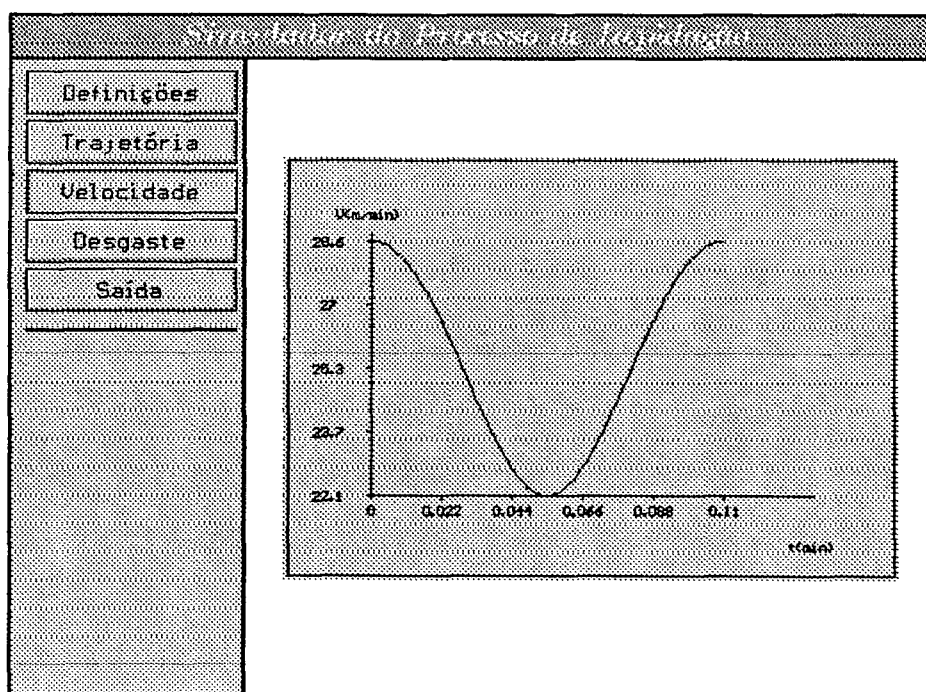


Figura - 1: Gráfico da velocidade em função do tempo da posição 0.

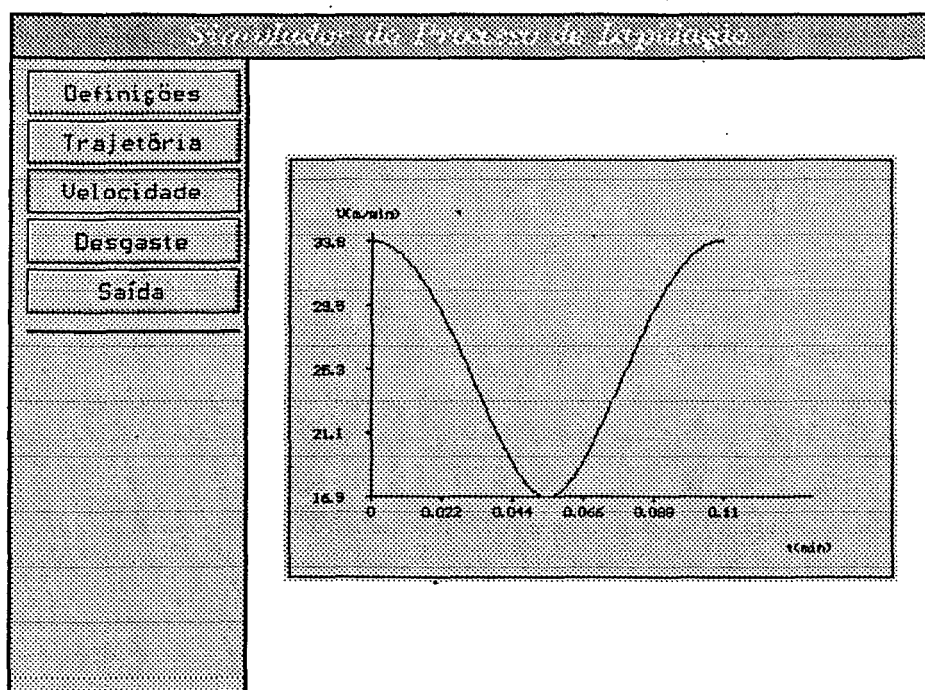


Figura - 2: Gráfico da velocidade em função do tempo das posições 1 e 7.

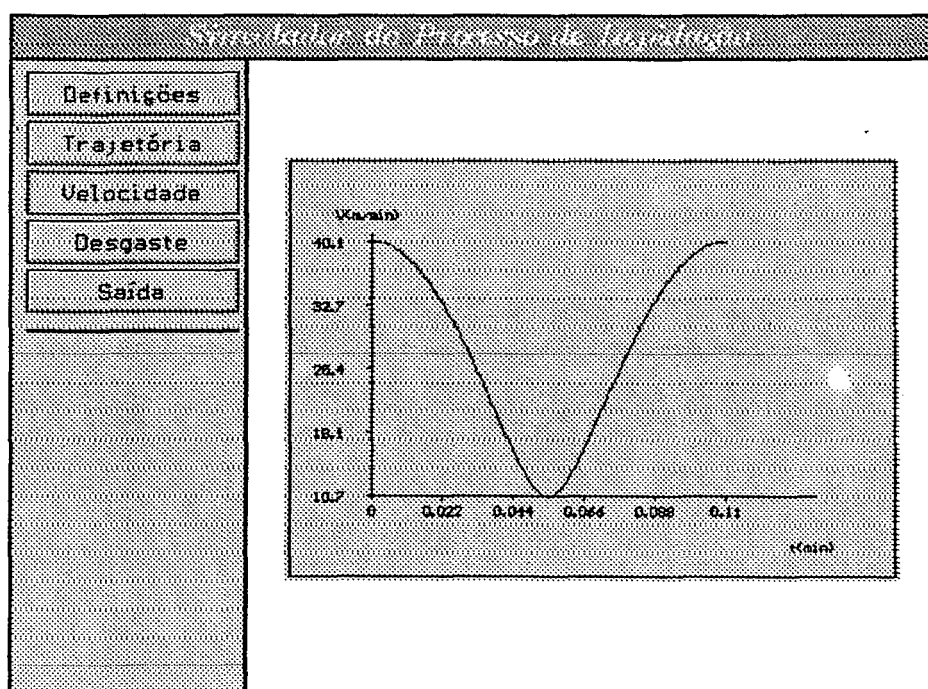


Figura - 3: Gráfico da velocidade em função do tempo das posições 2 e 6.

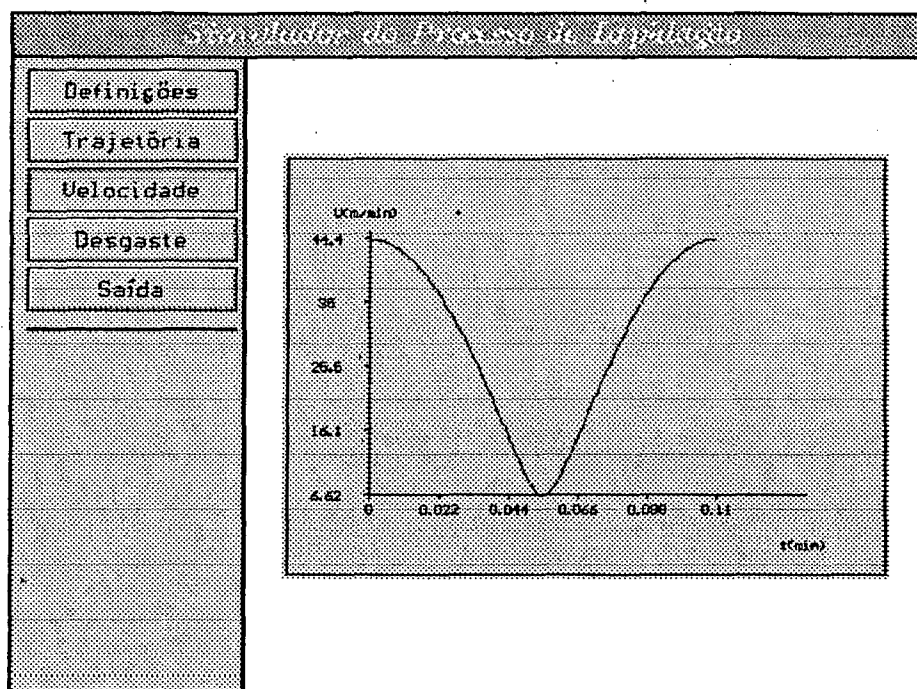


Figura - 4: Gráfico da velocidade em função do tempo das posições 3 e 5.

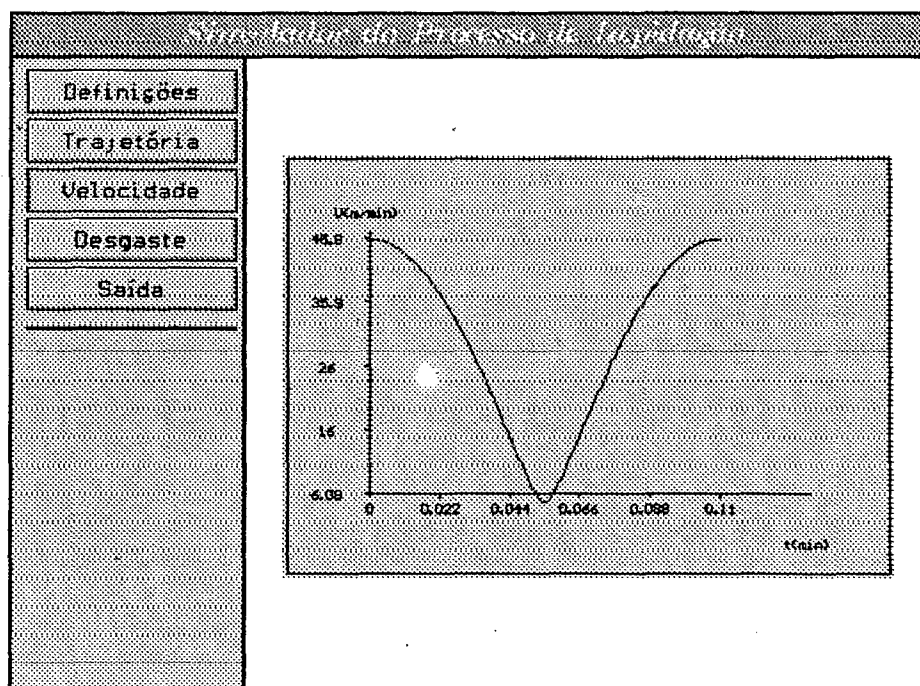


Figura - 5: Gráfico da velocidade em função do tempo da posição 4.

**ANEXO D****CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE REMOÇÃO****RELÓGIO COMPARADOR**

Executor da calibração: LABMETRO

Fabricante: CEJ

Modelo: Mikrokator 500 A-4

Faixa de operação:  $\pm 50 \mu\text{m}$

Divisão de escala:  $1 \mu\text{m}$

Síntese da calibração: Incerteza de Medição  $\pm 3,6 \mu\text{m}$

- Calibração no sentido anti-horário

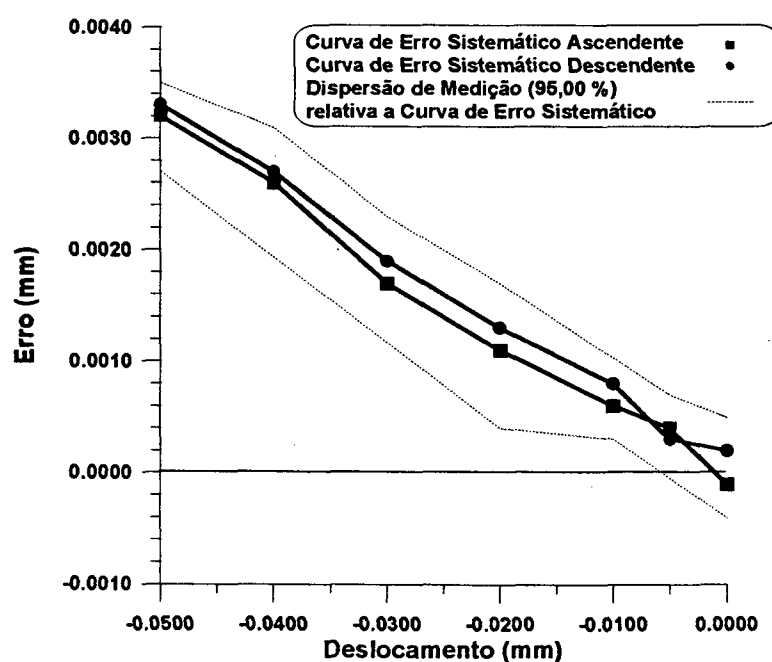


Figura - 1: Curva do erro sistemático no sentido anti-horário.



Incerteza da Medição: 0,0036 mm

Erro Sistemático Máximo: 0,0033 mm

Dispersão da Medição Máxima: 0,0007 mm

Função de Transferência Ascendente ( x - Leitura / Medida no Sist. de Med. a Calibrar)

$$1,06445 * X + 0,00007 \quad (mm) \quad (59)$$

- Calibração no sentido horário

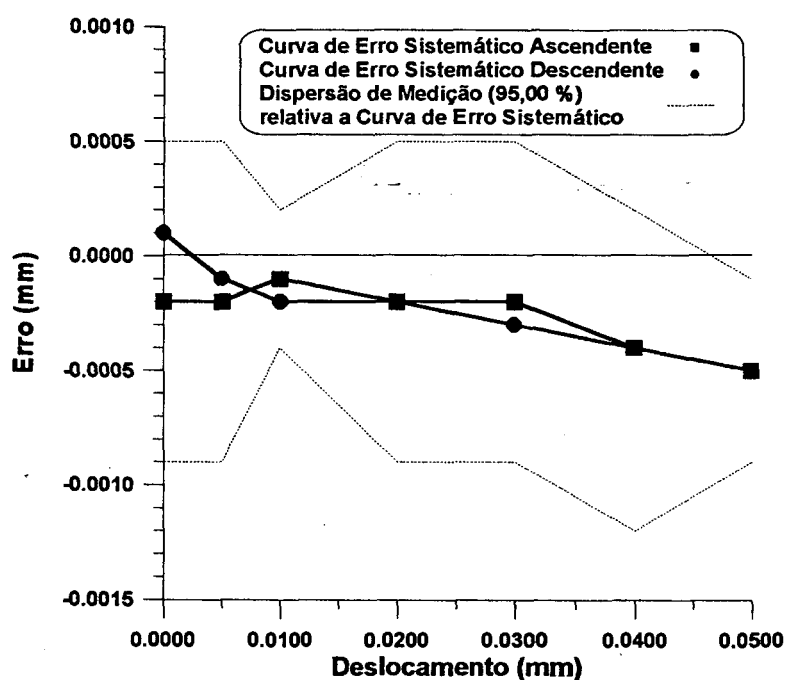


Figura - 2: Curva do erro sistemático no sentido horário.

Incerteza da Medição: 0,0012 mm

Erro Sistemático Máximo: -0,0005 mm

Dispersão da Medição Máxima: 0,0007 mm

Função de Transferência Ascendente ( x - Leitura / Medida no Sist. de Med. a Calibrar)

$$1,00750 * X + 0,00011 \quad (mm) \quad (60)$$